

ViReFuRa - Mit Virtual Reality zur Fußgänger- und Radverkehrsförderung

Forschungsbericht der Technischen Hochschule
Nürnberg Georg Simon Ohm
NCT - Intelligente Verkehrsplanung

in Zusammenarbeit mit der
Abteilung Verkehrsplanung der Stadt Fürth

- Abschlussbericht -

gefördert durch

Innovation und Zukunft Stiftung



Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Nuremberg Campus of Technology (NCT)
Forschungsprofessur für intelligente Verkehrsplanung

Leitung Prof. Dr.-Ing. Harald Kipke

Bearbeitung Daniela Ullmann, M.Eng.
Julian Kreimeier, M.Sc.

Beratung Fakultät Architektur, Prof. Dipl.-Ing. M.Sc. Ingrid Burgstaller

Mitwirkung Sabrina Breit, M.Sc.
Jan-Ole Hansen, B.Eng.
Pascal Karg, B.Sc.
Christoph Kielmann, M.A.

Fürther Straße 246b, 90429 Nürnberg

Telefon 0911-5880-1731
E-Mail daniela.ullmann@th-nuernberg.de

Beteiligung **Stadt Fürth, Abteilung Verkehrsplanung**

Dr.-Ing. Maximilian Hartl

Hirschenstraße 2, 90762 Fürth

Telefon 0911-974-3330
E-Mail maximilian.hartl@fuerth.de

www.fuerth.de

Förderung **Innovation und Zukunft Stiftung**

Barbara und Manfred Schmitz

Lange Zeile 30, 90419 Nürnberg

Telefon 0179-1019897
E-Mail innovationundzukunftstiftung@gmail.com

www.innovationzukunft.org

Nürnberg, 21.02.2022

Inhalt

1	Forschungsanlass	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Aufgabenstellung	2
2	Aktueller Stand der Forschung	4
2.1	Externe Forschungsarbeiten	4
2.2	Interne Vorlaufforschung	6
2.3	Schematischer Aufbau der Simulationen.....	8
3	Vorbereitungsphase	9
3.1	Auswahl des Straßenabschnitts aus der Praxis.....	9
3.2	Aufbau des 3D-Stadtmodells.....	9
3.3	Aufbau des Verkehrsmodells.....	10
3.4	Festlegung möglicher Einflussfaktoren.....	11
3.5	Erstellen der Simulationsumgebung.....	13
3.6	Pretests / Kalibrierung von Simulator und Simulation	16
4	Untersuchungsphase	18
4.1	Vorbereitung der Benutzerstudie.....	18
4.2	Durchführung der Benutzerstudie.....	20
4.3	Auswertung der Daten.....	21
5	Vorläufige Ergebnisse	22
6	Zusammenfassung.....	27
7	Weiterer Forschungsbedarf	28
8	Literaturverzeichnis	29
	Tabellenverzeichnis.....	IV
	Abbildungsverzeichnis.....	IV
	Anhang.....	V

1 Forschungsanlass

1.1 Ausgangslage

Während in den Städten der anhaltende Klimawandel immer stärker eine Fokussierung auf energiearme Mobilitätsformen auslöst, rückt vor allem die Förderung der nicht motorisierten Fortbewegungsarten in den Vordergrund stadt- und verkehrsplanerischer Bemühungen. Somit stehen Kommunen vor der großen Herausforderung, Konzepte zur Förderung des Zufußgehens und der Fahrradnutzung zu erarbeiten und den begrenzten urbanen Raum in seiner Gestaltung stärker an den Bedürfnissen dieser Verkehrsteilnehmer auszurichten. Dabei wird angestrebt, sowohl den individuellen Mobilitätsbedürfnissen der Menschen gerecht zu werden als auch die Gesundheits- und Umweltschäden zu minimieren. Dieses Ziel geht einher mit dem Wunsch der Stadtbewohner nach mehr urbaner Lebensqualität.

Hinsichtlich der konkreten Lösungskonzepte und deren Wirkung besteht jedoch noch häufig eine große Unsicherheit bei Entscheidungsträgern und Bürgern. Viele dieser Konzepte werden derzeit erstmalig erprobt, ohne die genauen Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Stadtbewohner zu kennen. Um die Wirkung gestalterischer Maßnahmen erklärbar machen zu können, ist es erforderlich die Wechselwirkungen zwischen den nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Radfahrern und der gestalteten Umgebung besser zu verstehen. Nur so können auch die erwünschten Änderungen im Mobilitätsverhalten ausgelöst werden, die dem Klimawandel rechtzeitig entgegenwirken, aber auch – infolge der zunehmenden Erwärmung – erforderliche Anpassungen im Stadtraum in ihrer Wirkung auf die Akzeptanz durch die Bürger überprüft werden. Bis heute fehlt ein Werkzeug mit dem die Wirkung von Gestaltungsänderungen im Stadtraum auf das Mobilitätsverhalten (von der strategischen bis zur operativen Ebene¹) und die gesellschaftliche Akzeptanz valide überprüft werden kann. Computergenerierte, interaktive virtuelle Umgebungen in Echtzeit ermöglichen die Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften und bieten die Chance, die Umwelt so nachzubilden, dass Veränderungen nicht nur gesehen, sondern auch erlebbar gemacht werden.

¹ Strategisch: Langfristige Entscheidungen, wie Wahl des Verkehrsmittels oder Routenwahl
Operativ: Intuitive Entscheidungen, wie spontanes Ausweichen gegenüber Hindernissen oder anderen Verkehrsteilnehmern

1.2 Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Forschungslücke setzte sich das vorliegende Projekt „ViReFuRa“ (Mit **V**irtual **R**eality zur **F**ußgänger- und **R**adverkehrsförderung) zum Ziel, die Virtual-Reality-Technologie in Kombination mit entsprechenden Simulatoren zu nutzen, um die Wirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren im städtischen Raum zu untersuchen. Virtual Reality (VR) ist dabei ein geeignetes Werkzeug, da identische und nahezu frei definierbare (virtuelle) städtische Räume mit methodisch variierten Verkehrsszenarien simuliert werden können. Dazu müssen mehrere Varianten eines Straßenzuges aus der Praxis entworfen und in eine virtuelle Umgebung implementiert werden. Für den Aufbau dieser Modelle muss zunächst der Ist-Zustand des Straßenzuges (Abmessungen, Verkehrsstärken, Lichtsignalregelungen, Architektur angrenzender Gebäude) erfasst werden. Auf Basis der gesammelten Daten wird anschließend ein 3D-Stadtmodell, welches alle statischen Objekte abbildet, sowie ein Verkehrsmodell, in dem alle Verkehrsteilnehmer sowie die Verkehrsregelungen simuliert werden, aufgebaut.

Für die Untersuchung der Einflussfaktoren ist in einem weiteren Schritt die Festlegung von verkehrlichen und städtebaulichen Parametern notwendig, die die Verkehrsmittelwahl im urbanen Raum beeinflussen könnten und um diese der modellierte Straßenzug verändert bzw. ergänzt werden. Somit entstehen mehrere Modelle, die sich durch jeweils einen Parameter vom Ist-Zustand unterscheiden. Durch eine Anbindung der Verkehrssimulation sowie die Integration der Stadtmodelle in die VR-Umgebung wird ein digitaler Zwilling des Straßenzuges geschaffen, durch den eine virtuelle Fortbewegung möglich ist. Um die Wirkung der Parameter im Hinblick auf die Bereitschaft zu Gehen und Rad zu fahren zu erheben, wird im letzten Schritt eine Benutzerstudie vorbereitet und durchgeführt. Mehrere Pretests sollen vor der eigentlichen Studie mögliche Probleme bei der Simulation aufdecken, damit später ein reibungsloser Ablauf gewährleistet werden kann. Hierbei ist besonders wichtig, dass für eine ausreichend realistische Fortbewegung auf der Stelle und eine damit einhergehende notwendige Immersion, die Simulatoren sowie die Visualisierung des städtischen Raums gezielt kalibriert werden müssen. Nach Abschluss der Benutzerstudie sollen die Daten ausgewertet und davon ausgehend entsprechende verkehrs- und stadtplanerische Konzepte für die Förderung nachhaltiger Mobilität abgeleitet werden.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse stets von der gewählten Versuchsanordnung abhängig sind und etwaige Zusammenhänge zwischen dem Untersuchungsdesign und der Bewertung bzw. der Wahrnehmung der Probanden bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden müssen.

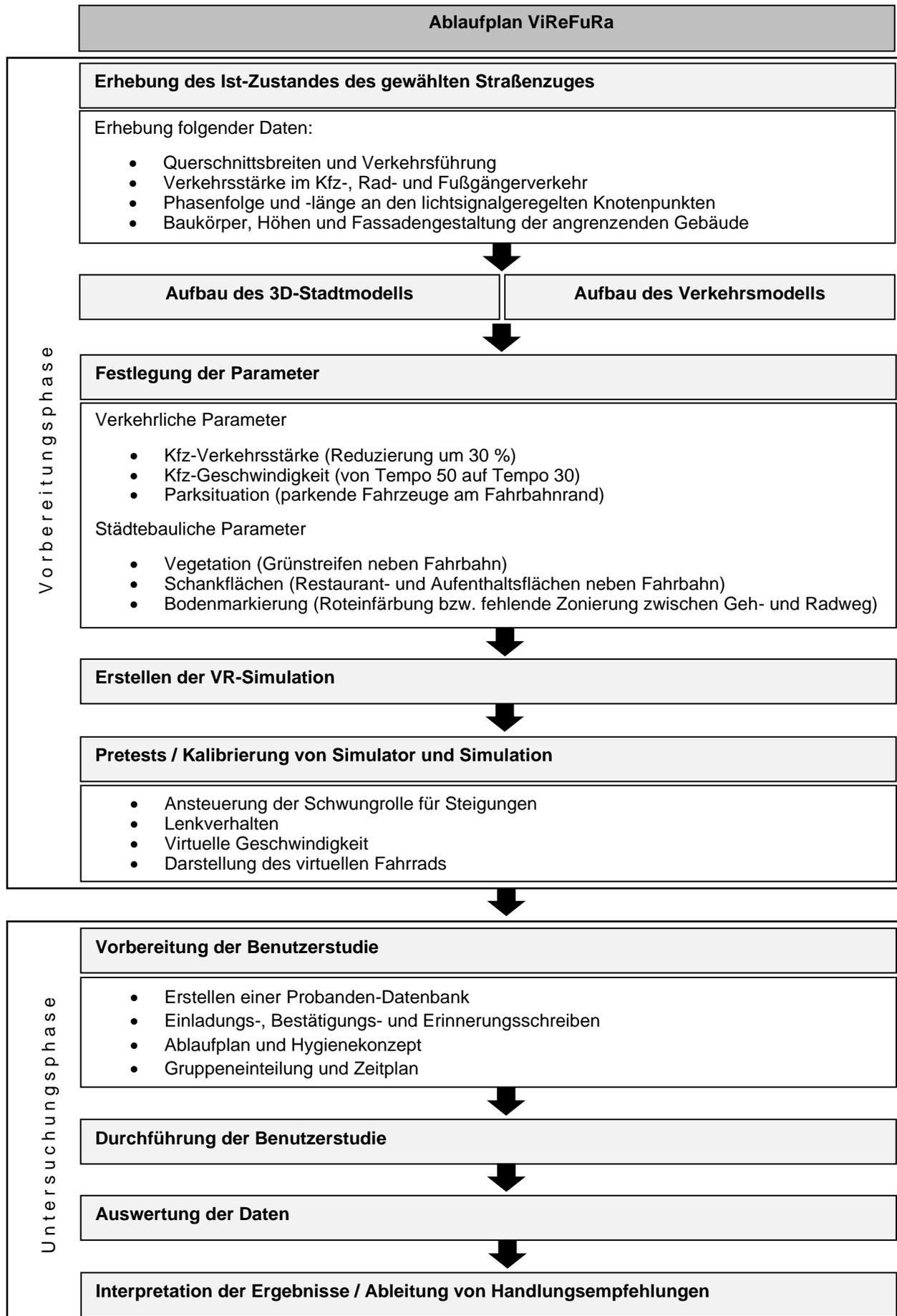


Abbildung 1: Untersuchungsablauf

2 Aktueller Stand der Forschung

In den letzten Jahren hat die VR-Technologie in verschiedenen Forschungsbereichen immer mehr an Bedeutung gewonnen. In der Verkehrsplanung ist sie jedoch noch ein recht neues und selten genutztes Werkzeug², weshalb verschiedene Methoden der Simulation des Fußgänger- und Radverkehrs in VR laufend getestet und evaluiert werden. Die beiden folgenden Kapitel geben einen Überblick über externe Forschungsarbeiten und vorangegangene Projekte an der TH Nürnberg, in denen mögliche Umsetzungen von Fußgänger- und Fahrradsimulatoren vorgestellt werden. Dieses Wissen bildete die Grundlage für die weiterführenden Aufgabenstellungen im ViReFuRa-Projekt.

2.1 Externe Forschungsarbeiten

Bei der Fußgängersimulation werden zwei wesentliche Arten der Fortbewegung klassifiziert: Tatsächliches Gehen (hier kann weiterhin zwischen dem realen Gehen³ und einem sogenannten *Walk-in-Place-Ansatz*⁴ unterschieden werden) und die Fortbewegung durch Teleportation⁵. Letztere kann beispielsweise mit einem *Joystick*⁶ im Sitzen oder Stehen gesteuert werden. Die Fortbewegung wird dabei visuell über ein *Head Mounted Display* (HMD)⁷ vermittelt. Durch die Diskrepanz zwischen visuellem Reiz (virtuelle Fortbewegung) und realer Bewegung (Stillstand) führt diese Methode allerdings schnell zu *motion sickness*⁸. Zudem bietet die unnatürliche Fortbewegungsart nicht die gewünschte Immersion⁹, die für die vorliegende Untersuchung von großer Bedeutung ist. Insbesondere eine realistische Geschwindigkeit, die bei Raumwahrnehmungen von Fußgängern entscheidend ist, kann mit Teleportation nicht simuliert werden. Dafür besteht bei der Umsetzung einer natürlichen Fortbewegung in VR die große Herausforderung, die virtuelle Welt in einem begrenzten Laborraum begehbar zu machen. Sogenannte *Treadmills* bieten hier den Vorteil, dass durch die glatte Oberfläche tatsächliche Schritte auf der Stelle ausgeführt werden können, die dem realen Gehverhalten zwar (noch) nicht gleichkommen, jedoch sehr ähneln. Die Hüfte wird dabei in einem Ring fixiert, der Richtungsänderungen ermöglicht. Indem sich der Nutzer nach vorne lehnt, kann er mit den Füßen über die Plattform gleiten. Die Schritte werden dabei

² vgl. Kreimeier et al. (2020)

³ vgl. Auda et al. (2019)

⁴ vgl. Razzaque et al. (2002)

⁵ vgl. Bozgeyikli et al. (2019); Funk et al. (2019)

⁶ vgl. Buttussi & Chittaro (2019)

⁷ Unter einem HMD ist eine „VR-Brille“ zu verstehen

⁸ Motion Sickness ist ein Zustand, in dem eine Unstimmigkeit zwischen visuell wahrgenommener Bewegung und tatsächlicher Bewegung besteht. Er äußert sich überwiegend durch Schwindelanfälle, Übelkeit und Schweißausbrüche.

⁹ vgl. Cherni et al. (2020)

anhand von Sensoren erkannt, die entweder in der Bodenplatte integriert oder an den Schuhen befestigt sind. Durch das tatsächliche Gehen wird hier die Gefahr von motion sickness zwar reduziert, dennoch besteht großes Optimierungspotenzial, um die Bewegungsabläufe beim natürlichen Gehen auch auf der Stelle zu realisieren.¹⁰ Vor diesem Hintergrund testete ein Nürnberger Softwareunternehmen für VR-Anwendungen unterschiedliche Modelle und bewertete unter anderem deren Benutzerfreundlichkeit und Fortbewegungskonzept.¹¹ Hierbei schnitt das Modell von *Cyberith* am besten ab. In dem Vergleich wird zudem deutlich, dass das derzeitige Angebot an Treadmills noch sehr überschaubar¹² und überwiegend auf die Gaming-Branche und das VR-Erlebnis an sich ausgerichtet ist. Mit dem Einsatz einer Treadmill zum Zwecke der Fußgängerforschung betritt daher das ViReFuRa-Projekt Neuland.

Im Bereich der Radverkehrsforschung gibt es hingegen einige Arbeiten, in denen die Anwendung unterschiedlicher Simulatoren vorgestellt wurde. SCHRAMKA et al.¹³ entwickelten einen Fahrradsimulator, der die Grundfunktionen Beschleunigen, Bremsen und Lenken ermöglicht. Da das verwendete Schwungrad jedoch zu Verzögerungen in der visuellen Simulation und damit der virtuellen Bewegung führte, wurden den Nutzern nur visuelle Informationen über ein HMD zugespielt, ohne dass diese die Bewegung des Radfahrens ausübten. NAZEMI et al.¹⁴ verbesserten dieses VR-Setup um akustisches Feedback durch Kopfhörer und untersuchten, wie sich verschiedene Straßen in Singapur auf das Geschwindigkeits- und Sicherheitsgefühl der Benutzer auswirkten. Allerdings wurde nach wie vor die Lenkung aufgrund schwerer Kinetosen deaktiviert. Die TU München stellte bei ihrem Fahrradsimulator ähnliche Probleme mit Schwindel und Übelkeit in Verbindung mit dem HMD fest, sodass KELER et al.¹⁵ das visuelle Feedback durch einen Bildschirm vor dem Simulator implementierten. BIALKOVA et al.¹⁶ von der Universität Utrecht führten mit ihrem Simulator Benutzerstudien durch und untersuchten, wie sich verschiedene Infrastrukturen und Umgebungen auf das Fahrerlebnis auswirken. Allerdings konnten auch hier die Teilnehmer aufgrund der VR-Krankheit mit einem HMD weder die Geschwindigkeit noch die Richtung des virtuellen Radfahrens regulieren. Eine weiterführende Untersuchung zu der Problematik von motion sickness bei Simulationen von GERŠAK et al.¹⁷ kam zu dem Schluss, dass ein HMD im Vergleich zu einem 2D-Monitor beim Betrachten eines Videoclips ohne physische, aber virtuelle Bewegung auf einer Achterbahn kein signifikant höheres Maß an VR-Krankheit auslöste. Anstelle eines wie in den bisherigen Arbeiten beschriebenen stationären Ansatzes,

¹⁰ Ebda.

¹¹ vgl. Cykyria (2021)

¹² www.virtuix.com | www.cyberith.com | www.kat-vr.com

¹³ vgl. Schramka et al. (2018)

¹⁴ vgl. Nazemi et al. (2019)

¹⁵ vgl. Keler et al. (2018)

¹⁶ vgl. Bialkova et al. (2018)

¹⁷ vgl. Geršak et al. (2020)

gibt es auch die Möglichkeit das Fahrrad auf einer Bewegungsplattform zu montieren. CHEN et al.¹⁸, SCHULZYK et al.¹⁹ oder DIALYNAS et al.²⁰ bauten eine solche CAVE²¹ mit verschiedenen Freiheitsgraden und der Möglichkeit verschiedene Oberflächengeometrien physisch zu simulieren. Jedoch ist dieser Aufbau recht aufwändig und anspruchsvoll, da mindestens drei Projektionsflächen notwendig sind, die die Plattform umhüllen. Laut COLOMBET et al.²² bietet eine CAVE im Vergleich zu einem HMD keine Vorteile in Bezug auf motion sickness, weshalb sich das Forschungsteam gegen einen solchen Aufbau entschied.

2.2 Interne Vorlaufforschung

Vor knapp zwei Jahren evaluierte das interdisziplinäre Forschungsteam am Nuremberg Campus of Technology (NCT) unter der Leitung von Prof. KIPKE und Prof. GÖTZELMANN unterschiedliche Arten der Fortbewegung für Fußgänger in VR.²³ Hierbei wurden zwei Tretmühlen der Hersteller *Cyberith* und *Virtuix Omni* sowie der Einsatz von Trackern, die an den Fußgelenken angebracht werden, getestet. Bei Letzterem wird durch das Heben der Beine auf der Stelle eine Fortbewegung erkannt. Im Rahmen einer Benutzerstudie wurde u.a. abgefragt, wie sicher sich die Probanden mit der entsprechenden Fortbewegungsart fühlen, wie genau diese umgesetzt wird und wie intuitiv das Gehgefühl ist. Es stellte sich heraus, dass die Simulation in den Tretmühlen sicherer, genauer und realistischer ist als bei der Umsetzung mit den Trackern. Weiterhin sollte von den Probanden die Geschwindigkeits- und Energieverrechnung mit der beim realen Zufußgehen verglichen werden. Hier schnitt insgesamt das Modell von *Cyberith* am besten ab, weshalb sich das Forschungsteam im Rahmen des ViReFuRa-Projektes dafür entschied, mit diesem Instrument weiterzuarbeiten, um Einflussfaktoren bei Fußgängern im urbanen Raum zu untersuchen.

Hinsichtlich der Simulation des Fahrradfahrens in VR, waren die unterschiedlichen stationären Ansätze und jeweiligen Ergebnisse der externen Forschungsarbeiten hinsichtlich motion sickness entscheidende Faktoren, die beim Aufbau des eigenen Fahrradsimulators berücksichtigt wurden. Großer Wert wurde dabei auf eine unmittelbare Übertragung der physischen Bewegung in die virtuelle Simulation gelegt. Bei der Wahrnehmung und Bewertung einer Stadtumgebung spielt die Immersion eine wichtige Rolle. Insofern sollte die Simulation so real wie möglich sein, indem nicht nur das Pedalieren, sondern auch das eigenständige

¹⁸ vgl. Chen et al. (2007)

¹⁹ vgl. Schulzyk et al. (2009)

²⁰ vgl. Dialynas et al. (2019)

²¹ CAVE steht für *Cave Automatic Virtual Environment* und bezeichnet eine dreidimensionale Projektion der VR-Welt im Raum.

²² vgl. Colombet et al. (2016)

²³ vgl. Kreimeier et al. (2020)

Lenken ermöglicht wird. Darüber hinaus wurden Eye-Tracking-Auswertungen angestrebt, sodass die Verwendung eines externen Monitors beim damaligen Aufbau des Simulators nicht in Frage kam. In Anbetracht der geschilderten Erfahrungen anderer Arbeiten und der im vorliegenden Projekt geplanten Verwendung eines HMD bestand die Gefahr, dass das gewählte Setup zu motion sickness führen könnte. Um diese Gefahr zu reduzieren, wurde das visuelle um ein akustisches Feedback erweitert und ein statischer Rollentrainer ohne seitliche Federung gewählt. Damit stimmt das visuell übermittelte Bild (nicht geneigter Horizont) mit der physischen Bewegung (kein seitliches Lehnen) bei einer Kurvenfahrt überein.

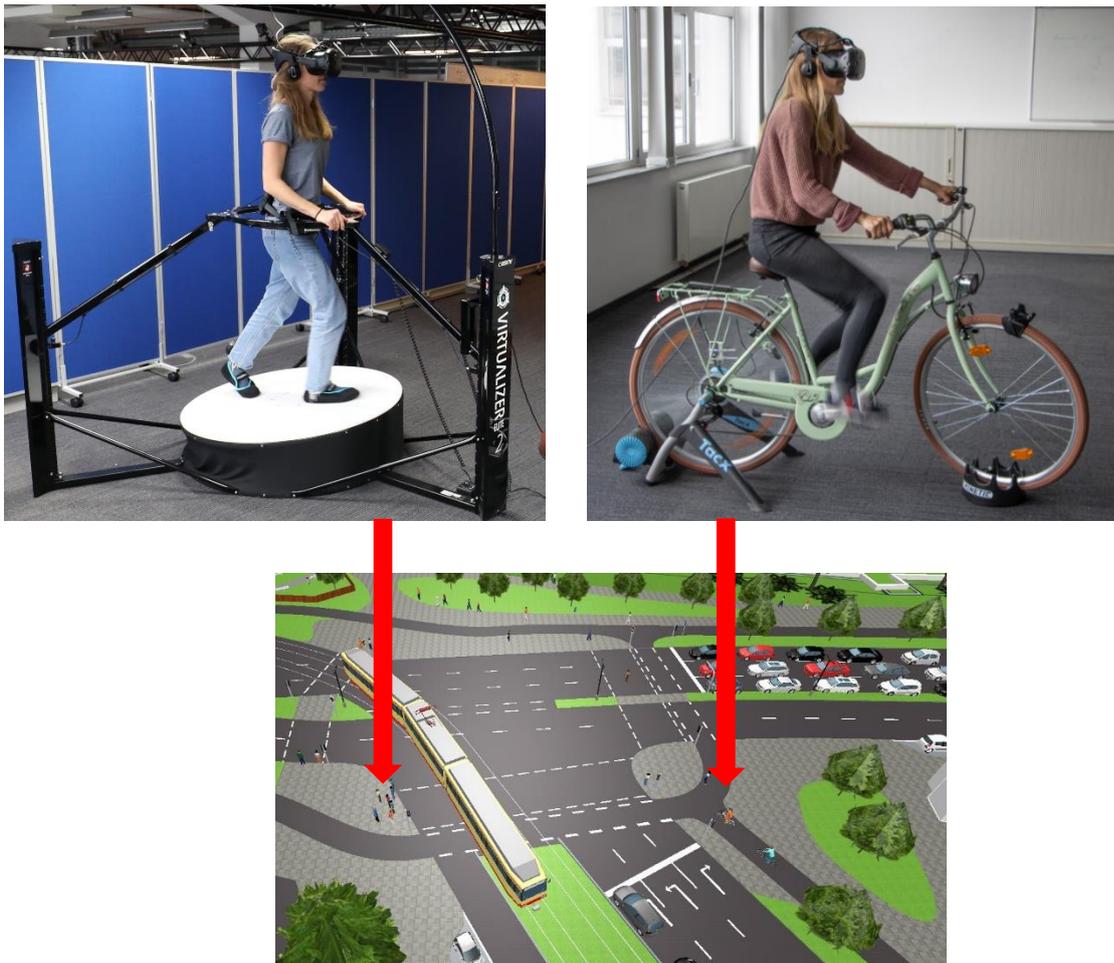


Abbildung 2: Fußgängersimulator (links), Fahrradsimulator (rechts) mit VR-Umgebung (unten)

Erste einfache VR-Umgebungen wurden bereits vor Projektbeginn aufgebaut, um die Funktion der Simulationen zu testen. Dazu wurden die Design-Software *Google SketchUp* für die Modellierung von Gebäuden und Straßen sowie die Software *PTV Vissim* für die Verkehrssimulation verwendet. Am Anwendungsbeispiel der Bahnhofstraße in Nürnberg wurde die Modellgröße und Simulationsleistung getestet, um Aussagen zum Detaillierungsgrad und der Abschnittslänge des simulierten Straßenzuges für die eigentliche Untersuchung treffen zu können. Mit dem erarbeiteten Forschungsstand sollte eine realistische aber trotzdem ruckelfreie Darstellung in den ViReFuRa-Simulationen ermöglicht werden.

2.3 Schematischer Aufbau der Simulationen

Bis der Nutzer durch die simulierte Umgebung gehen bzw. fahren kann, muss die Realität zunächst nachgebaut und in die Simulationsumgebung integriert werden. Folgende Abbildung zeigt das Zusammenspiel der dafür notwendigen Hard- und Softwarekomponenten.

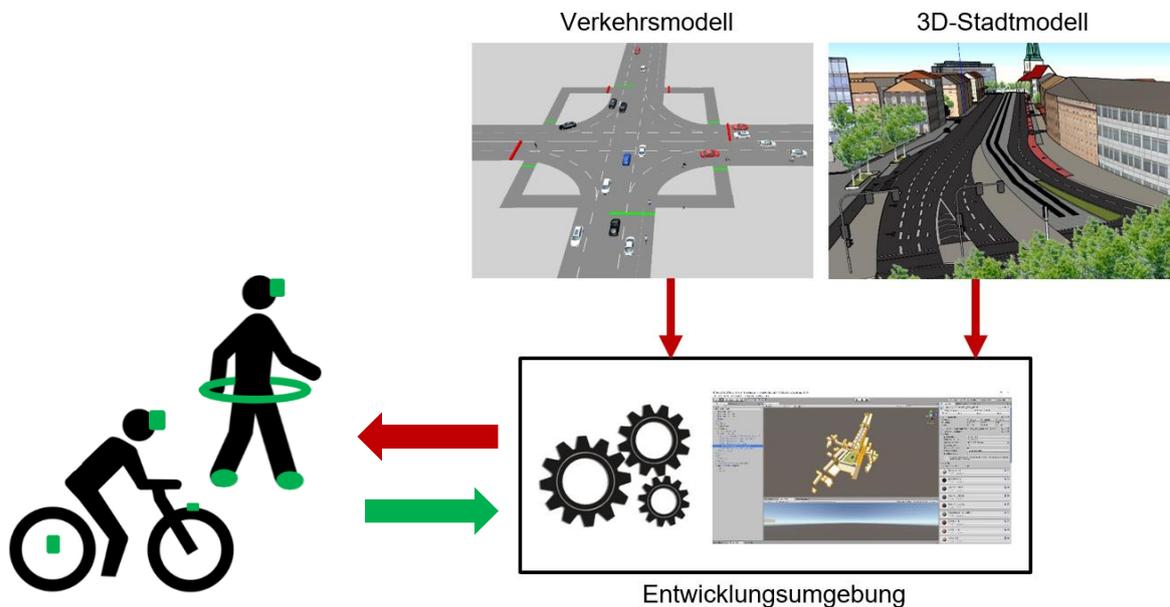


Abbildung 3: Funktionsprinzip der Fahrrad- und Fußgängersimulation

Zunächst werden alle bewegten Objekte in einem Verkehrsmodell modelliert. Hierunter zählen alle Verkehrsteilnehmer (Kfz, Radfahrer, Fußgänger) sowie die Lichtsignalsteuerung. Das zugrundeliegende Verkehrsverhalten wie zum Beispiel die mittlere Geschwindigkeit, Vorfahrtsregeln, Überhol- und Abstandsverhalten, Befolgungsgrad und Routenwahl kann hier ebenfalls im gewünschten Detaillierungsgrad eingestellt werden. In einem zweiten Modell, dem 3D-Stadtmodell, werden alle statischen Objekte wie Gebäude, Straßenmarkierungen, Bodenbeläge und Bäume modelliert. Hierfür kommen unterschiedliche Softwareprogramme in Frage, die im Falle des Verkehrsmodells eine Schnittstelle zur Entwicklungsumgebung aufweisen bzw. im Falle des Stadtmodells dieses in ein entsprechendes Dateiformat (.obj, .fbx oder .dae) exportieren können. Anschließend werden das Verkehrs- und Stadtmodell in eine Entwicklungsumgebung übertragen, die wiederum die visuellen Informationen an den Nutzer weitergibt (roter Pfeil). Damit die Simulation aber auch auf die Bewegungen des Nutzers reagiert, senden Sensoren, die am Simulator bzw. am Nutzer selbst angebracht sind, die Position im virtuellen Raum an die Entwicklungsumgebung zurück (grüner Pfeil).

3 Vorbereitungsphase

3.1 Auswahl des Straßenabschnitts aus der Praxis

Als Untersuchungsgegenstand wurde ein Abschnitt der Schwabacher Straße in Fürth (von der Karolinen- bis Herrnstraße) gewählt, da diese vor dem Projektstart noch keine Radverkehrsinfrastruktur sowie sehr geringe Gehwegbreiten aufwies. Weiterhin ist der Straßenverlauf weitestgehend geradlinig, was die virtuelle Fortbewegung erleichtert und keine großen Lenkbewegungen auf dem Fahrradsimulator erfordert. Der gewählte Abschnitt weist einen homogenen Straßencharakter mit einem einheitlichen Stadtbild auf, sodass keine zusätzlichen, unerwünschten Reize auf die Probanden einwirken. Die Straße ist eine der wichtigsten Verbindungsachsen in Fürth und von einer hohen Verkehrsdichte geprägt, weshalb zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung für den Kfz-Verkehr zur Verfügung stehen. Auf dem gesamten Abschnitt gilt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Somit ist eine ausreichende Querschnittsbreite vorhanden, um den Straßenraum neu aufzuteilen. Indem verschiedene Verkehrsführungen und Stadtraumgestaltungen im Modell virtuell variiert werden, können deren Auswirkungen auf u.a. die subjektive Sicherheit und Attraktivität im Rahmen einer Benutzerstudie abgefragt werden.



Abbildung 4: Streckenabschnitt Schwabacher Straße

3.2 Aufbau des 3D-Stadtmodells

Für die dreidimensionale Modellierung der Straßen und angrenzenden Gebäude wurden die Programme *Rhinoceros 3D* und *Google SketchUp* verwendet. Als Grundlage wurden von der Abteilung Verkehrsplanung der Stadt Fürth Lagepläne zur Verfügung gestellt. In *Rhinoceros 3D* wurden die Baukörper entlang des Abschnitts sowie die der Seitenstraßen modelliert, die in allen Szenen identisch sind. In einem weiteren Modell wurde unabhängig von den Gebäuden eine Bodenplatte mit Bordsteinen, Verkehrsinseln und Straßenmarkierungen erstellt.

Da sich der Abstand zwischen den gegenüberliegenden Baulinien nicht verändert, musste im späteren Verlauf für die Erstellung der einzelnen Varianten nur die Bodenplatte mit der entsprechend angepassten Verkehrsführung (vgl. Tabelle 2) und nicht das komplette 3D-Modell ausgetauscht werden. Für die Fassaden wurden Fotos in der Schwabacher Straße aufgenommen, die anschließend in *Google SketchUp* auf die jeweiligen Gebäude projiziert wurden. Durch Bildbearbeitung wurde Passanten, parkende Fahrzeuge und weitere Objekte, die sich während der Aufnahmen auf Höhe der Erdgeschosszone befanden, herausretuschiert. Auf einzelnen Fassadenflächen, wo dies nicht möglich war, wurden frei verfügbare Gebäudetexturen von *Google SketchUp* verwendet, die sich in das Gesamtbild der Schwabacher Straße einfügten. Weitere 3D-Objekte wie Bäume, Straßenschilder, Lichtsignalmasten oder Bänke wurden auf der Plattform *Sketchfab* oder im *Unity Asset Store* heruntergeladen und danach in das virtuelle Modell eingefügt.

3.3 Aufbau des Verkehrsmodells

Der Aufbau des Verkehrsmodells erfolgte mit dem mikroskopischen Simulationsprogramm *Vissim* der *PTV Group*. Als Grundlage für die statischen Modelle und die Straßenverkehrsführung dynamischer Objekte wurden dieselben Lagepläne verwendet, damit Stadt- und Verkehrsmodell später übereinandergelegt werden können und der Maßstab sowie der Straßenverlauf übereinstimmen. Für die Aufnahme der Verkehrsbelastungen wurden in Zusammenarbeit mit der Abteilung Verkehrsplanung der Stadt Fürth Verkehrszählungen an jedem Knotenpunkt zwischen Karolinen- und Herrnstraße durchgeführt. Zur Anwendung kamen die Verkehrszählgeräte von *Miovision*, die an Schilder- oder Laternenmasten angebracht wurden, so dass der gesamte Knotenpunkt mit all seinen Zufahrten gut einsehbar war. Die Geräte erfassten die Anzahl und Fahrtrichtung des Kfz-, Rad- und Fußgängerverkehrs für 24 Stunden. Anschließend wurde die Verkehrsspitzenstunde von 16 bis 17 Uhr ausgewertet²⁴ und die gemessene Verkehrsstärke in das Verkehrsmodell implementiert. Für den sogenannten „Nullfall“ wurde die Verkehrsführung in der Ist-Situation vor den Umplanungen der Stadt Fürth übernommen. Das bedeutet, dass im Modell beidseitig keine Radverkehrsinfrastruktur vorhanden ist und der Radverkehr mit dem Kfz-Verkehr im Mischverkehr auf der Fahrbahn fließt. Eine Ausnahme bildet der parkende Kfz-Verkehr. Da dieser bereits ein zu untersuchender Einflussfaktor ist, wurde er in Fahrtrichtung Süden (stadtauswärts) für die Abbildung des Nullfalls herausgenommen. Während die Fahrbahnstreifenbreiten entlang des realen Streckenabschnitts von 2,00 bis 4,00 m variieren, beträgt

²⁴ Aufgrund der Wetterverhältnisse am Messtag (Regen ab 17 Uhr) wurde statt der üblichen Spitzenstunde von 17 bis 18 Uhr, die Verkehrsstärke von 16 bis 17 Uhr ausgewertet.

die Gehwegbreite in beiden Richtungen durchgehend 1,85 m. Die folgende Abbildung zeigt den Querschnitt im Nullfall 1. Die rot markierten Zahlen wurden für die Modellierung verwendet, da einheitliche Fahrbahnbreiten den parallelen Aufbau von Stadt- und Verkehrsmodell vereinfachten.

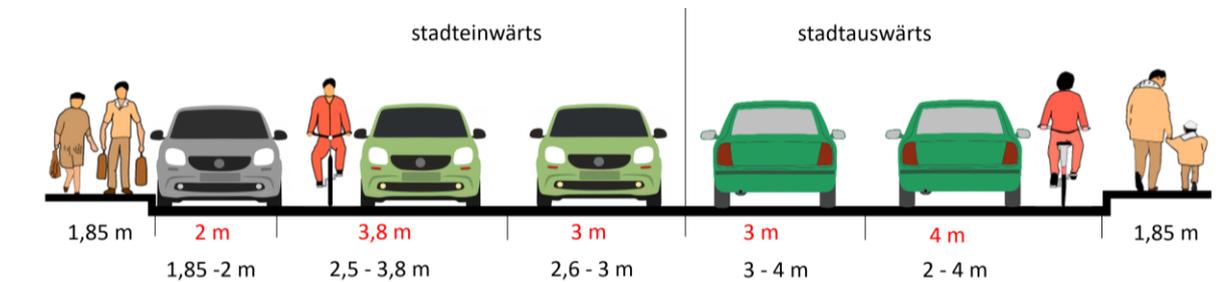


Abbildung 5: Straßenquerschnitt im Nullfall 1

Zur realitätsgetreuen Abbildung des Verkehrsflusses wurden dem Forschungsteam die Lichtsignalprogramme aller Knotenpunkte entlang des Untersuchungsabschnittes von der Stadt Fürth übermittelt. Diese wurden in die mikroskopische Modellumgebung implementiert. Mit Ausnahme von zwei Knotenpunkten (Kreuzung Salzstraße und Kreuzung Holzstraße) liegen in der Realität Festzeitsteuerungen vor. Bei den beiden verkehrsabhängigen Steuerungen, an denen ein Anforderungstaster für die Fußgänger vorhanden ist, wurde im Modell der Einfachheit halber Dauergrün in der Hauptverkehrsrichtung eingestellt und der Fußgängerquerverkehr unterbunden. Diese Entscheidung wurde angesichts des sehr geringen Fußgängerverkehrsanteils getroffen. Da zunächst die Modelle für die Fahrradstudie aufgebaut wurden, wurden dadurch auch die Belange des Radverkehrs in der Hauptrichtung priorisiert.

3.4 Festlegung möglicher Einflussfaktoren

Die Auswahl möglicher Einflussfaktoren erfolgte anhand der einschlägigen Literatur. Hierzu wurden die Ergebnisse von Feldstudien und Online-Befragungen, die die subjektive Sicherheit von Fußgängern und Radfahrern untersuchten, herangezogen. Es wurde eine Einteilung in verkehrliche und städtebauliche Einflussfaktoren vorgenommen. Die städtebaulichen Einflussfaktoren wurden gemeinsam mit der Fakultät Architektur unter der Leitung von Prof. BURGSTALLER festgelegt. Es wurde darauf geachtet, dass zu den (möglichen) Einflussfaktoren noch keine oder widersprüchliche Erkenntnisse in der Wissenschaft vorliegen, um hier einen entscheidenden Forschungsbeitrag zu leisten. Die Erkenntnislage ist dabei nicht immer eindeutig. So gibt es zum Beispiel Studien, die eine positive Wirkung von Grünflächen auf die

Bereitschaft Rad zu fahren ermittelten²⁵ und andere, die keinen belegbaren Zusammenhang feststellten.²⁶

Verkehrliche Einflussfaktoren	Städtebauliche Einflussfaktoren
Kfz-Verkehrsstärke (reduziert um 30%)	Vegetation (Grünstreifen)
Kfz-Geschwindigkeit (Tempo 30)	Erdgeschossnutzung (Schankflächen)
Parken am Fahrbahnrand	Bodenmarkierung

Tabelle 1: Zu untersuchende Parameter

Ein entscheidender Faktor bei der Wahrnehmung und der damit einhergehenden Sicherheits- und Attraktivitätsbewertung im Radverkehr ist die Führungsform. Je nachdem, ob der Radverkehr fahrbahnseitig im Mischverkehr oder auf einem baulich getrennten Radweg im Seitenraum geführt wird, können unterschiedliche Faktoren unterschiedliche Wirkungen zur Folge haben. So wurde beispielsweise nachgewiesen, dass das subjektive Sicherheitsempfinden im Zusammenhang mit parkenden Fahrzeugen am Fahrbahnrand bei einer Führung linksseitig vom ruhenden Kfz-Verkehr (auf der Fahrbahn) geringer ist als bei rechtsseitiger Führung (im Seitenraum).²⁷ Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde jeder Parameter bei jeder möglichen Führungsformen (Fahren im Mischverkehr, auf einem markierten Radfahrstreifen und auf einem baulich getrennten Radweg) untersucht. Die Wirkung einer veränderten Bodenmarkierung wurde lediglich beim Radfahrstreifen und Radweg ermittelt, da im Mischverkehr wegen der fehlenden Infrastruktur keine Markierung für den Radverkehr vorhanden ist. Hierfür wurde der Radfahrstreifen rot markiert und beim Radweg die Führungsform von einem getrennten Geh- und Radweg zu einem gemeinsamen Geh- und Radweg ohne „Leitlinien“ abgeändert. Die Führung des Fußgängerverkehrs erfolgt ausschließlich über einen Gehweg, weshalb hier im Gegensatz zum Radverkehr keine Unterschiede in der Führungsform vorgenommen wurden.

Somit entstanden insgesamt 20 verschiedene Szenarien mit drei Arten der Radverkehrsführung, in denen jeweils ein Parameter verändert wurde. In der nachfolgenden Tabelle sind die unterschiedlichen Untersuchungsfälle zusammengefasst. Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, wird die derzeitige Ist-Situation²⁸ als Nullfall 1 bezeichnet. In Nullfall 2 (Radfahrstreifen) und Nullfall 3 (baulich getrennter Radweg) ist für den Radverkehr eine eigene Infrastruktur ausgewiesen; alle anderen verkehrlichen und städtebaulichen Gegebenheiten

²⁵ vgl. Wahlgren & Schantz (2012): 11; Wendel-Vos et al. (2004)

²⁶ vgl. Moudon et al. (2005): 245-261; vgl. Winters et al. (2010): 5

²⁷ vgl. FixMyCity (2020)

²⁸ Derzeit befindet sich die Schwabacher Straße im Umbau. Seit über einem Jahr wird der Verkehr durch eine vorübergehende „Gelbmarkierung“ geführt, die eine Zwischenlösung vor dem eigentlichen Umbau darstellt. Unter der hier beschriebenen „Ist-Situation“ ist daher die Verkehrsführung vor den Umplanungen der Stadt Fürth zu verstehen.

bleiben hierbei unverändert. In den darunter aufgelisteten Varianten wurde die dort beschriebene Änderung bezogen auf den jeweiligen Nullfall vorgenommen.

Keine Radverkehrsanlage (Fahren im Mischverkehr mit Kfz-Verkehr)	Nullfall 1
	Reduzierte Verkehrsstärke (um 30%)
	Tempo 30
	Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand
	Grünstreifen neben Fahrbahn
	Restaurant- und Aufenthaltsflächen neben Fahrbahn
Markierter Radfahrstreifen auf Fahrbahn	Nullfall 2
	Reduzierte Verkehrsstärke (um 30 %)
	Tempo 30
	Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand
	Grünstreifen neben Fahrbahn
	Restaurant- und Aufenthaltsflächen neben Fahrbahn
	Rot markierter Radfahrstreifen
Baulich getrennter Radweg neben Gehweg	Nullfall 3
	Reduzierte Verkehrsstärke (um 30 %)
	Tempo 30
	Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand
	Grünstreifen neben Fahrbahn
	Restaurant- und Aufenthaltsflächen neben Fahrbahn
Gemeinsamer Geh- und Radweg ohne Trennfunktion	

Tabelle 2: Im Modell untersuchte Führungsformen des Radverkehrs unter unterschiedlichen verkehrlichen und städtebaulichen Gegebenheiten

3.5 Erstellen der Simulationsumgebung

Nach dem Aufbau des 3D-Modells, des Verkehrsmodells sowie aller dazugehöriger Varianten wurden die 20 Szenarien in die VR-Engine *Unity* übertragen. Hierfür mussten das Stadt- und Verkehrsmodell in der Simulationsumgebung zunächst georeferenziert werden. Eine Fläche von 1x1 m mit identischen Koordinaten, die abseits des Streckenabschnitts in beiden Modellen eingefügt wurde, erleichterte deren Ausrichtung. Anschließend wurden zahlreiche Optimierungen in der Darstellung von 3D-Objekten vorgenommen. Dies betraf unter anderem die Visualisierung der Lichtsignalanlagen, die in *PTV Vissim* lediglich durch rote bzw. grüne Balken am Boden erfolgt. Daher wurden Ampelmasten eingefügt und das entsprechende Signal aus *Vissim* den Lichtkegeln der Ampelmasten zugeordnet. Weiterhin ist in *Vissim* eine geringe Anzahl an Fahrzeugdarstellungstypen hinterlegt. Für Radfahrer und Fußgänger gibt es sogar nur jeweils ein 3D-Modell. So wurde der Fuhrpark um weitere Fahrzeugmodelle mit unterschiedlichen Farben erweitert und Animationen wie das Drehen der Autoreifen hinzugefügt. Weitere Personenmodelle sowie deren Animation (Gehen, Stehen, Radfahren) wurden in *Mixamo* heruntergeladen und in die Simulation integriert. Die Visualisierung des virtuellen Fahrrads, auf dem die Probanden den Streckenabschnitt abfahren, sollte möglichst

dem realen Modell entsprechend, das für den Simulator verwendet wurde. Bei der Modellierung wurde insbesondere auf eine Übereinstimmung von Lenkergeometrie und Farbe von Rahmen und Sattel / Griffen geachtet.

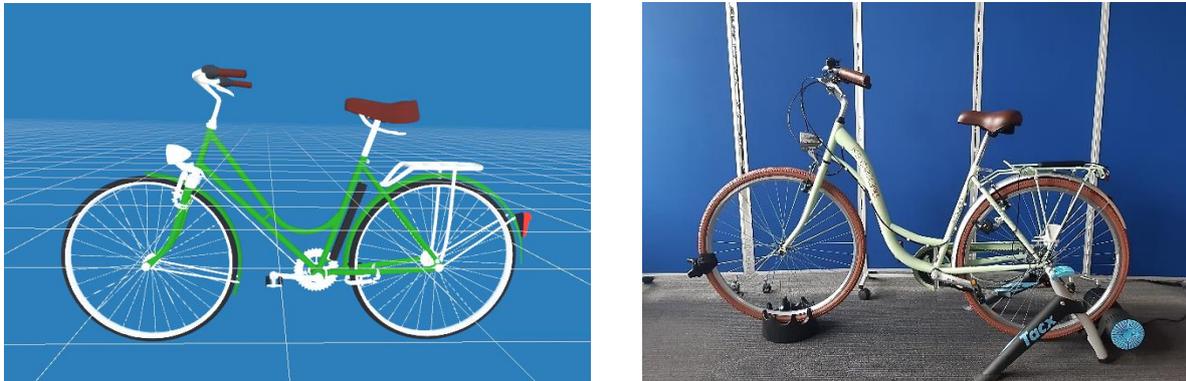


Abbildung 6: Virtuelles Fahrrad (links); reales Fahrrad (rechts)

Um sich mit dem virtuellen Fahrradfahren bzw. Zufußgehen vertraut zu machen, wurde in *Unity* zusätzlich eine Beispielszene erstellt. Diese bestand aus einer einfachen geraden Strecke mit Pylonen. Bei einer ersten Probefahrt bzw. einem ersten Probegang sollten die Probanden diesen ausweichen und somit ein Gefühl für das Lenkverhalten bzw. die Richtungssteuerung im Fußgängersimulator sowie die Geschwindigkeit entwickeln.



Abbildung 7: Teststrecke für Probefahrt

In einem weiteren Schritt wurde festgelegt, an welchem Punkt die Probanden im Modell der Schwabacher Straße starten sollen. Wichtig war hier, dass es keine Konfliktpunkte mit anderen Verkehrsteilnehmern gibt sowie eine uneingeschränkte Sicht auf die Fahrt- / Gehstrecke. Aus diesen Gründen entschied man sich für die Haltelinie vor der Lichtsignalanlage des ersten Knotenpunktes (Karolinenstraße). Weiterhin wurde eine Ziellinie am Ende der Strecke, kurz vor dem letzten Knotenpunkt (Herrnstraße), die durch eine rote Linie am Boden gekennzeichnet wurde, eingefügt. Für eine Vergleichbarkeit der Daten war jedoch nicht nur ein genauer Start- und Zielpunkt, sondern auch ein einheitlicher Zeitpunkt notwendig, sodass jeder Proband exakt dieselbe Verkehrssituation erfährt. Bis das Verkehrsmodell die vorgegebene

Verkehrsbelastung erreicht hat, vergehen einige Minuten. Somit wurde eine Simulationssekunde festgelegt, in der sich einerseits das Modell mit ausreichend Verkehrsteilnehmern angereichert hat und andererseits die Lichtsignalanlage nur wenige Sekunden später von Rot auf Grün wechselte. Bis zu dieser Sekunde wurde die Simulation im Schnellmodus vorsimuliert. Sobald der Proband an den besagten Startpunkt gesetzt wurde, wurde die Simulation in Echtzeit fortgeführt. Um eine einfache und reibungslose Eingabe der Befehle (Start, Stopp, Setzen auf Ausgangsposition) während der Studie zu ermöglichen, wurde hierfür eine grafische Benutzeroberfläche mit Schaltflächen erstellt.

Die im Rahmen der Studie anfallenden Daten wie die Fahrtzeit, die zurückgelegte Distanz sowie die fortlaufende Position des Probanden sollten automatisch mitdokumentiert werden. Hierfür wurde ein Programm geschrieben, das die Uhrzeit und Koordinaten aufzeichnet und beim Beenden der Simulation eine Excel-Tabelle mit den Daten erzeugt. So können im Nachgang unter anderem Geschwindigkeiten und Fahr- / Gehlinien ausgewertet werden. Aber nicht nur die Position des Radfahrers bzw. des Fußgängers, sondern auch die Blickrichtung und entsprechende Fixationspunkte der Probanden sollten durch ein in der VR-Brille integriertes Eye-Tracking erhoben werden, um später Aussagen zur visuellen Wahrnehmung und zu (un)bewussten Stressoren im Stadtraum treffen zu können. Dazu wurden sog. *Areas of Interests* (AOI) in der VR-Simulation festgelegt. Insgesamt sollten sechs AOI bestimmt werden: die Fahrbahn links des Probanden, die vor dem Probanden liegende Fahrt-/ Gehstrecke, der Gehweg rechts des Probanden, Gebäude bzw. Fassaden sowie der Parkstreifen bzw. die Grünflächen in den jeweiligen Szenarien. Sobald der Blick in eine AOI fällt, wird die Fixationsdauer aufgenommen.

Nullfall 1 - Fahren im Mischverkehr	Reduzierte Verkehrsstärke um 30 %	Reduzierte Kfz-Geschwindigkeit (30 km/h)
		
Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	Grünstreifen mit Bäumen am Fahrbahnrand	Restaurants und Schankflächen am Fahrbahnrand
		

Abbildung 8: Modellvarianten Mischverkehr

Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Führung des Radverkehrs im Mischverkehr die Umsetzung der oben genannten Parameter in der VR-Simulation. Die Szenarien mit der Führung auf dem Radfahrstreifen bzw. Radweg befinden sich für eine bessere Übersicht im Anhang (Seiten VI f.).

3.6 Pretests / Kalibrierung von Simulator und Simulation

Vor der Benutzerstudie wurde die virtuelle Geschwindigkeit in den Simulatoren kalibriert. Hierfür wurde eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit im Radverkehr von 20 km/h²⁹ und im Fußgängerverkehr von 4 km/h³⁰ zugrunde gelegt. Anhand der Streckenlänge (Distanz von Start- zu Zielpunkt) und der benötigten Fahrt- / Gehzeit in den jeweiligen Simulatoren konnte die virtuelle Geschwindigkeit berechnet und entsprechend angepasst werden. Beim Fahrradsimulator wurde zudem der Radumfang und die damit einhergehende zurückgelegte Strecke bei einer Radumdrehung bestimmt und in die VR-Simulation übertragen.

Am Beginn der Strecke (zwischen den ersten beiden Knotenpunkten) befindet sich eine leichte Steigung von gut 5 %. Der dadurch auftretende Widerstand beim Treten wurde bei der Ansteuerung der Schwungrolle des verwendeten Rollentrainers berücksichtigt. Sobald ein Proband in den Steigungsbereich einfährt, wird der Widerstand der Schwungroll erhöht und das Treten dadurch erschwert. Eine weitere Herausforderung bei der Simulation des Radfahrens war die Lenkung. Im Gegensatz zur realen Kurvenfahrt, die durch Gewichtsverlagerung eingeleitet wird, wird der virtuelle Kurvenradius durch einen VR-Tracker, der am Vorderrand befestigt ist und den Einschlagwinkel des Lenkers ausliest, bestimmt. Das bedeutet, dass die virtuelle Kurvenfahrt allein durch die Lenkung und nicht durch seitliches Lehnen erfolgt. Diese Bewegung ist zunächst kontraintuitiv und erfordert eine gewisse Übung. So stellte das Forschungsteam in mehreren Pretests fest, dass das Lenkverhalten – besonders bei Personen ohne VR-Erfahrung – schnell zu motion sickness führen kann. In vereinzelt Fällen führten die Schwindelanfälle sogar zum Abbruch des Testlaufs. Die ursprünglich angestrebte Methodik, die Stadtmodelle über eine VR-Brille zu simulieren, musste demnach verworfen werden. Kleinste Abweichungen zwischen visuellem (das Bild, das durch die VR-Brille zu sehen ist) und physischem Feedback (Fahrdynamik am Fahrradsimulator) können zu Kinetosen führen, die eine Weiterfahrt in VR unmöglich machen. Die Kurvenfahrt gestaltete sich hier als besonders problematisch, da eine Gewichtsverlagerung beim Lenken (in die Kurve lehnen) nicht in die visuelle Ansicht übertragen wird. Die Verwendung eines statischen Rollentrainers ohne seitliche Federung erschwert zwar eine Gewichtsverlagerung, sie ist jedoch dennoch möglich. Darüber hinaus gibt es in VR keine Anhaltspunkte, an denen sich das Auge orientieren könnte und die eine gewisse Sicherheit

²⁹ vgl. Kipke & Ullmann (2021): 16

³⁰ vgl. BMVIT (2016): 16

während der Simulation bieten würden. Somit entschied sich das Forschungsteam für eine Simulation, die auf einem 85 Zoll Monitor, der vor dem Fahrrad aufgebaut wurde, zu sehen ist (siehe Abbildung 9). Hierbei konnten die Probanden trotzdem ihre Geschwindigkeit selbst regulieren (beschleunigen / bremsen) und lenken. Der Laborraum, der aus den Augenwinkeln links und rechts des Bildschirms noch zu sehen ist, gab den Testprobanden die nötige Sicherheit, sodass keine nennenswerten Probleme mit Schwindel mehr auftraten oder die Fahrt abgebrochen werden musste. Für eine erhöhte Immersion wurde zusätzlich der Lenker in der Simulation dargestellt, der sich bei Lenkbewegungen mit dreht. Der dafür notwendige VR-Tracker reagiert allerdings sehr sensibel auf Bewegungen, was nach wie vor zu unsicheren Testfahrten führte. Kleinste Lenkbewegungen werden bereits erkannt und erfordern eine sofortige Gegenlenkung, wodurch eine wankende Fahrt entstehen kann. Daher legte das Forschungsteam einen Totbereich von $\pm 2^\circ$ fest, in dem die tatsächliche Bewegung nicht in die virtuelle übertragen wird. Wird stärker als 2° eingelenkt, wird dieser Lenkwinkel zusätzlich durch 2,5 geteilt. Diese Lenkübersetzung bot den Testpersonen die größte Sicherheit und stellte den besten Kompromiss dar, um ein ständiges Korrigieren der Fahrlinie zu verhindern und dennoch eine Lenkung zu ermöglichen.



Abbildung 9: Verändertes Setup ohne VR-Brille nach Pretests

Die Einstellungen, die für das veränderte Setup vorgenommen werden mussten, waren im Maßnahmenplan des Projekts nicht vorgesehen und erforderten eine flexible Anpassung der Arbeitsschritte, sodass die hierfür notwendige Zeit nicht einkalkuliert war. Hinzu kamen die Vorbereitungen, die für die anfänglich geplante Umsetzung mit der VR-Brille inklusive des Eye-Trackings durchgeführt wurden und letztendlich verworfen werden mussten. Dies führte dazu, dass – abgesehen von der Geschwindigkeit – der Fußgängersimulator nicht weiter kalibriert werden konnte und die Benutzerstudie lediglich mit dem Fahrradsimulator durchgeführt wurde. Die Hygieneauflagen aufgrund der Corona-Pandemie erschwerten zudem die Abwicklung größerer Probandengruppen, sodass vorerst die für die Radverkehrsstudie vorgesehenen 90 Probanden eingeladen wurden.

4 Untersuchungsphase

4.1 Vorbereitung der Benutzerstudie

Nach der Fertigstellung und Anpassung der Simulation wurden die Probanden für die Benutzerstudie per Mail eingeladen. Hierfür wurden Bekannte und Verwandte des Forschungsteams sowie des Fördergebers akquiriert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die eingeladenen Personen keine Kenntnis über die zu untersuchenden Parameter haben. Ziel war es eine möglichst heterogene Probandengruppe hinsichtlich des Geschlechts, Alters und der Verkehrsmittelwahl im Alltag zu erreichen. Für einen reibungslosen Ablauf vor Ort wurde pro Proband ein Zeitfenster von 30 Minuten einkalkuliert. Zusätzlich wurde nach drei aufeinanderfolgenden Zeitfenstern ein Puffer von 15 Minuten eingeplant, um möglichen Verspätungen oder Komplikationen bei der Simulation vorzubeugen. Über vier Wochen wurden jeweils die Tage Donnerstag bis Samstag angeboten, sodass insgesamt 176 Zeitfenster für die vorgesehenen 90 Probanden zur Verfügung standen. Die Termineintragung erfolgte über den DFN-Terminplaner. Sobald ein Proband seinen Wunschtermin eingetragen hatte, erhielt er eine Bestätigungsmail mit der Anfahrtsskizze. Zwei Tage vor dem jeweiligen Termin wurde eine Erinnerungsmail mit dem entsprechenden Hygienekonzept versendet. Hierin wurde auf die 3-G-Regelung sowie auf das Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung vor und nach der Fahrt mit dem Fahrradsimulator hingewiesen. Vor Ort wurde ein kleiner Wartebereich mit Sitzgelegenheiten, Freigetränken und Zeitschriften eingerichtet, wo sich die Probanden bis zu Beginn ihres Zeitfensters aufhalten konnten. Der Fahrradsimulator wurde mit Stellwänden abgeschirmt, sodass der Laborbereich vor der Teilnahme noch nicht einsehbar war.

Für eine ausreichende Stichprobe sollte jeder Parameter von mindestens 10 Personen bewertet werden. Insgesamt sollte eine Person nicht mehr als drei Szenarien durchfahren. Die erste Fahrt war immer der Nullfall der jeweiligen Führungsform (Mischverkehr, Radfahrstreifen oder Radweg), damit davon ausgehend die vorgenommene Änderung in den beiden darauffolgenden Szenarien bewertet werden konnte. Durch eine Einteilung der Probanden in sechs Gruppen (drei Gruppen je Führungsform) konnten die soeben genannten Voraussetzungen erfüllt werden. Die Gruppeneinteilung befindet sich im Anhang (Seite VIII).

Im Rahmen einer kurzen Befragung vor der Fahrt wurden zunächst folgende Angaben zur Person von einem Mitarbeiter der TH Nürnberg abgefragt und notiert:

- Alter
- Geschlecht
- Bevorzugte(s) Verkehrsmittel im Alltag
- VR-Erfahrung
- Schwindelprobleme im Alltag

Der dazugehörige Fragebogen befindet sich im Anhang (Seite IX).

Neben der Aufnahme der personenbezogenen Daten, sollten im Rahmen der Benutzerstudie die in Kapitel 3.4 aufgelisteten Parameter analysiert werden. Dazu muss in Erfahrung gebracht werden, ob diese Veränderungen wahrgenommen werden und wenn ja, wie sie sich auf die subjektive Sicherheit, die Attraktivität des städtebaulichen Umfelds sowie die Bereitschaft Rad zu fahren auswirken. Weiterhin war die Zeit- und Entfernungswahrnehmung unter unterschiedlichen Bedingungen zu ermitteln. Somit wurden folgende Informationen anhand eines Fragebogens, der den Probanden nach jeder Fahrt überreicht und von diesen eigenständig ausgefüllt wird, abgefragt:

- Wahrnehmung der Änderung (ausgenommen bei der ersten Fahrt)
- Sicherheitsempfinden
- Attraktivität des städtebaulichen Umfelds
- Bereitschaft Rad zu fahren
- Angabe, was einem (nicht) gefallen hat
- Geschätzte Fahrlänge
- Geschätzte Fahrtzeit
- Schwindel während der Simulation (nach der jeweiligen Fahrt)
- Ortskenntnis über die befahrene Strecke (nach letzter Fahrt)

Der Fragebogen wurde von der TH Nürnberg entworfen und mit dem Institut für empirische Soziologie (IfeS) abgestimmt. Im Anhang ist der Fragebogen von Gruppe 1A beispielhaft eingefügt (Seiten X ff.). Bei den Fragen zum Sicherheitsempfinden und der Attraktivität wurde eine Likert-Skala von 1 (sehr unsicher / sehr unattraktiv) bis 10 (sehr sicher / sehr attraktiv) gewählt. Die Bereitschaft Rad zu fahren sollte von den Probanden anhand einer verbalisierten Skala von „auf keinen Fall“ bis „auf jeden Fall“ eingestuft werden. Was der jeweiligen Person an der Fahrt gefallen bzw. nicht gefallen hat, wurde als offene Frage formuliert, während die Schätzungen am Ende des Fragebogens in Metern bzw. Minuten angegeben werden sollten. Unabhängig von den veränderten Parametern und Führungsformen blieben die gestellten Fragen bei jeder Fahrt stets unverändert, sodass später eine Vergleichbarkeit untereinander möglich ist. Wie beim Simulator wurde zunächst ein Pretest mit dem erstellten Fragebogen durchgeführt, um seine Praxiseignung zu testen. Es wurden insbesondere die Verständlichkeit – sowohl für den Befragten als auch für den Befrager – sowie der logische Aufbau geprüft.

4.2 Durchführung der Benutzerstudie

Die Benutzerstudie begann am 28. Oktober und endete am 20. November. Überschneidungen im Zeitplan durch kurzfristige Terminänderungen oder Absagen sowie der Hackerangriff auf die TH Nürnberg in der Nacht des 1. November³¹ führten zu organisatorischen und technischen Herausforderungen, die zu einer ungleichen Verteilung in den drei Fällen führten. Der Stichprobenumfang erhöhte sich und das Ziel von mindestens 10 Probanden je Parameter bzw. 30 Probanden je Führungsform wurde sogar übertroffen. Insgesamt nahmen 93 Probanden an der Benutzerstudie teil, deren Angaben im Nachgang ausgewertet werden können.

	Mischverkehr	Radfahrstreifen	Radweg
Anzahl Probanden	31	32	30
Gesamt	93		

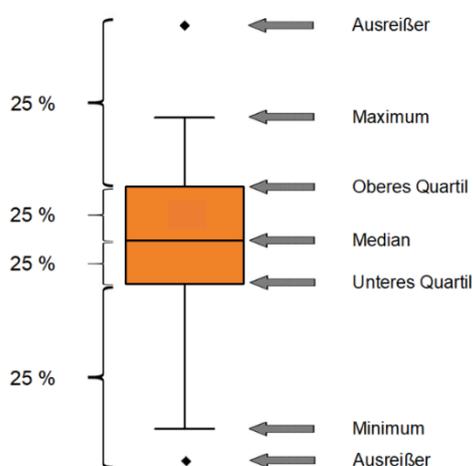
Tabelle 3: Übersicht der auswertbaren Fragebögen

Der Ablauf der Benutzerstudie erfolgte grob in drei Schritten. Zunächst wurde der Proband begrüßt und in den Laborbereich geführt, wo der Aufbau des Fahrradsimulators erklärt wurde. Dabei wurde insbesondere auf das Lenken und Bremsen eingegangen. Anhand eines 3D gedruckten Stadtmodells der Schwabacher Straße im Maßstab 1:30.000 wurde aufgezeigt, wo der Proband startet, wo er entlangfahren soll und wo sich die Ziellinie befindet. Durch die Visualisierung der Fahraufgabe fiel es den Probanden leichter, sich auf das Bevorstehende einzustellen und sich in der Simulation zurechtzufinden. Weiterhin wurde erklärt, dass der gezeigte Streckenabschnitt insgesamt dreimal durchfahren werden soll und sich jeweils eine Sache ausgehend von der ersten Fahrt ändert. Was sich ändert wurde nicht mitgeteilt. Der Proband wurde weiterhin darauf hingewiesen, dass er nicht gezielt nach Änderungen suchen, sondern sich vorstellen soll, er würde den Streckenabschnitt in der Realität abfahren. Sollten keine Änderungen wahrgenommen werden, ist der Streckenabschnitt so zu bewerten wie der erste. Bevor die Testfahrt startete, wurden noch die Sattelhöhe eingestellt und die personenbezogenen Daten aufgenommen. Im zweiten Teil der Benutzerstudie erfolgten die Simulatorfahrten und Bewertungen durch die Probanden selbst. Nach jeder Fahrt wurde der im vorherigen Kapitel vorgestellte Fragebogen überreicht, der entweder direkt auf dem Fahrrad oder auf einem Stuhl neben dem Simulator ausgefüllt werden konnte. In der Zwischenzeit wurde die Simulation der nächsten Szene geladen. Nachdem der dritte Fragebogen ausgefüllt war, wurden die Probanden in einem letzten Schritt gefragt, ob ihnen der Streckenabschnitt aus der Realität bekannt vorgekommen ist und ob die TH Nürnberg sie erneut für eine Benutzerstudie kontaktieren dürfte. Als Dankeschön für ihre Teilnahme, konnten sich die Probanden ein Getränk aussuchen und wurden anschließend verabschiedet.

³¹ vgl. Pressemitteilung der TH Nürnberg vom 04.11.21 „Cyberangriff auf TH Nürnberg“

4.3 Auswertung der Daten

Die anhand der Fragebögen gewonnenen Daten wurden in eine Datenbank übertragen, um statistische Tests und Auswertungen durchführen zu können. Damit auch im Nachgang noch eine eindeutige Zuordnung der Daten zu dem entsprechenden Fragebogen möglich ist, wurde in der Datenbank jedem Probanden eine anonymisierte ID zugewiesen. Neben der Berechnung von Mittelwert und Median wurden t-Tests durchgeführt, um herauszufinden, ob die unterschiedlichen Bewertungen der einzelnen Parameter zufällig oder signifikant sind. Innerhalb einer Gruppe (vgl. Anhang Seite VIII) wurde ein t-Test für abhängige Stichproben bzw. zwischen den Gruppen für unabhängige Stichproben durchgeführt. Hier wurde die Nullhypothese H_0 : „Die Stichproben gehören zur gleichen Grundgesamtheit“ mit einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha=0,05$) gegen die Gegenhypothese H_1 : „Die Stichproben gehören nicht zur gleichen Grundgesamtheit“ geprüft. Voraussetzung für das Durchführen der statistischen Tests war das Vorliegen einer Normalverteilung. Sofern dieses Kriterium nicht erfüllt wurde, wurden die Stichproben mit einem Mann-Whitney-U-Test (für unabhängige Stichproben) bzw. einem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (für abhängige Stichproben) ausgewertet. Die mitdokumentierte Fahrzeit und -länge wurden den Schätzungen der Probanden gegenübergestellt und ermittelt, in welchen Szenarien die Fahrzeit und -länge überschätzt bzw. unterschätzt wurde. Die bereits ausgewerteten Daten werden im folgenden Kapitel in Form von Boxplots grafisch dargestellt. Bei dieser Art der Datenaufbereitung werden in einer komprimierten Darstellung mehrere Informationen wie Streuungs- und Lagemaße einer oder mehrerer Stichproben zusammengefasst, womit große Datenmengen gut strukturiert werden können. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau eines Boxplots exemplarisch erklärt.



Kennwert	Beschreibung
Ausreißer	Ungewöhnliche Extremwerte außerhalb des anzunehmenden Streuungsbereiches (optional)
Maximum	Größter Wert innerhalb der Datenreihe
Oberes Quartil (75%-Quartil)	75 % aller Werte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert
Median (Linie)	50 % aller Werte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert
Unteres Quartil (25%-Quartil)	25 % aller Werte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert
Minimum	Kleinster Wert innerhalb der Datenreihe

Abbildung 10: Boxplot-Erklärung (Quelle: Eigene Darstellung nach Cleff 2015)

5 Vorläufige Ergebnisse

Insgesamt nahmen 45 weibliche, 47 männliche Personen sowie eine diverse Person an der Studie teil. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 14 und 66 Jahren; das Durchschnittsalter beträgt 37 Jahre. Ein entscheidendes Kriterium bei der Auswertung war die Vergleichbarkeit der Angaben der unterschiedlichen Personen. Vereinzelt wurde angegeben, dass zu Beginn der Fahrt (meist während der Probefahrt) noch leider Schwindel aufgetreten ist. Hier wurde aber festgestellt, dass es zwischen Schwindel und Sicherheitsbewertung keinen Zusammenhang gibt und daher die Daten zusammen ausgewertet werden können. Ebenso gibt es in der durchgeführten Versuchsanordnung keine Korrelation zwischen dem bevorzugten Verkehrsmittel und der Sicherheitsbewertung, sodass ausgeschlossen werden kann, dass Radfahrer den Streckenabschnitt signifikant besser oder schlechter bewerteten als Autofahrer.

Bevor die Bewertungen hinsichtlich der subjektiven Sicherheit und Attraktivität dargestellt und interpretiert werden, ist die Wahrnehmung genauer zu betrachten.

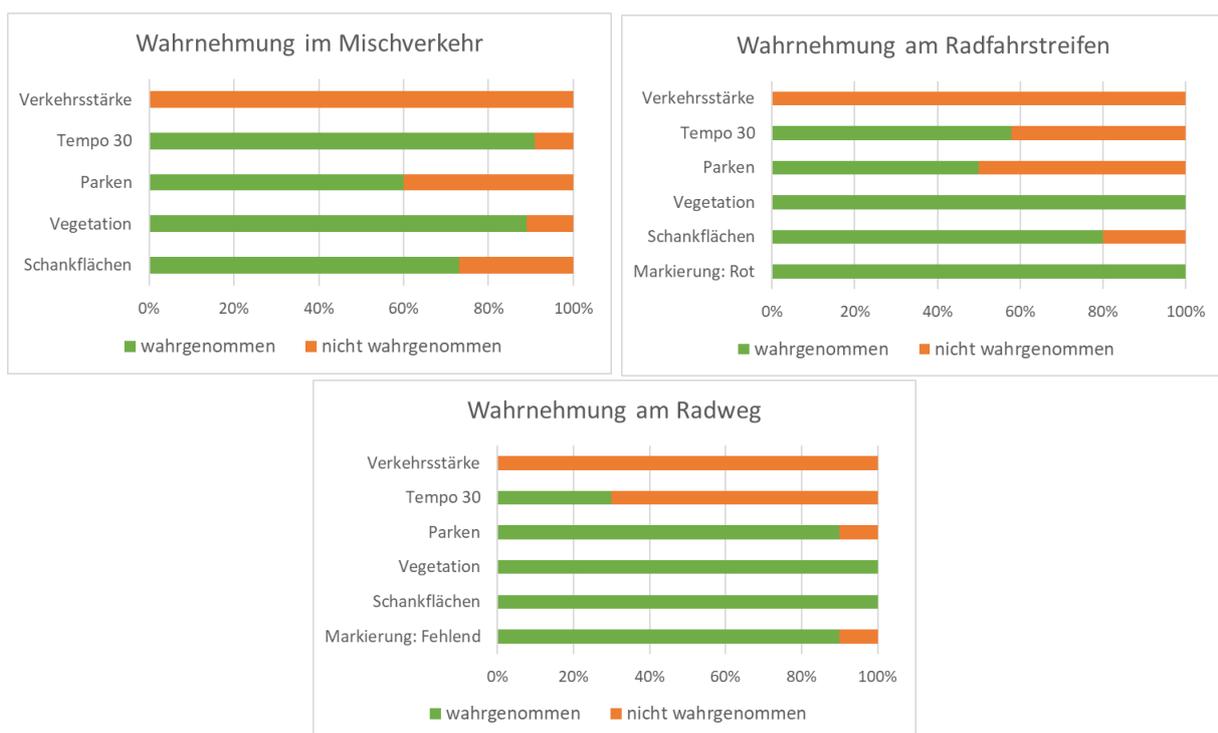


Abbildung 11: Wahrnehmung der Veränderungen auf unterschiedlichen Führungsformen

Hier ist auffällig, dass die reduzierte Verkehrsbelastung um 30 % von keinem der über 90 Probanden wahrgenommen wurde. Dies könnte darin begründet liegen, dass eine solche Belastungsänderung zu gering ist, als dass sie wahrgenommen wird. Die Verkehrsstärke wird nämlich überwiegend auditiv und nicht visuell wahrgenommen. Zwar war der Verkehrslärm durch die Lautsprecher am Monitor zu hören, jedoch nehmen Menschen erst eine Lärmveränderung ab drei Dezibel wahr. Aus diesem Grund werden verkehrsrechtliche Maßnahmen, die eine Pegelminderung von weniger als drei Dezibel zur Folge haben, häufig

abgelehnt.³² Übertragen auf eine Verkehrsreduzierung bedeutet das, dass erst eine Halbierung bzw. Verdoppelung des Verkehrs hörbar ist³³, jedoch nicht die 30 % wie in der vorliegenden Untersuchung. Betrachtet man die Verteilungen in den anderen Szenarien ist festzustellen, dass fahrbahnseitige Parameter, die auf den Kfz-Verkehr gerichtet sind (z.B. Tempo 30), auch eher bei fahrbahnseitiger Führung auffielen, als seitenraumnahe Parameter (z.B. Parken am Fahrbahnrand, der Grünstreifen oder die Schankflächen). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Aufmerksamkeit von Radfahrern, für die keine eigens ausgewiesene Infrastruktur vorhanden ist und sich daher die Fahrbahn mit den Autos teilen müssen, überwiegend dem fließenden Verkehr links von ihnen gilt. Daher spielen auch Verkehrsregelungen wie eine Geschwindigkeitsreduzierung, die sich auf den Verkehrsfluss und somit auf das eigene Fahrverhalten auswirken, eine entscheidendere Rolle als bei der Führung auf einem eigenen Radfahrstreifen oder gesonderten Radweg. Stadtplanerische Elemente, die für diese Fahraufgabe nicht relevant sind, werden ausgeblendet und somit weniger wahrgenommen.

Die folgende Darstellung zeigt die Sicherheitsbewertung in allen Szenarien eingeteilt in die drei Führungsformen. Da sich die Signifikanzen von allen teilgenommenen Probanden nicht von denjenigen Probanden, die die jeweilige Maßnahme wahrgenommen hatten, unterscheiden, werden die Bewertungen der gesamten Stichprobe dargestellt. Bei der Interpretation der Daten müssen jedoch die Ergebnisse der Wahrnehmung aus Abbildung 11 berücksichtigt werden.

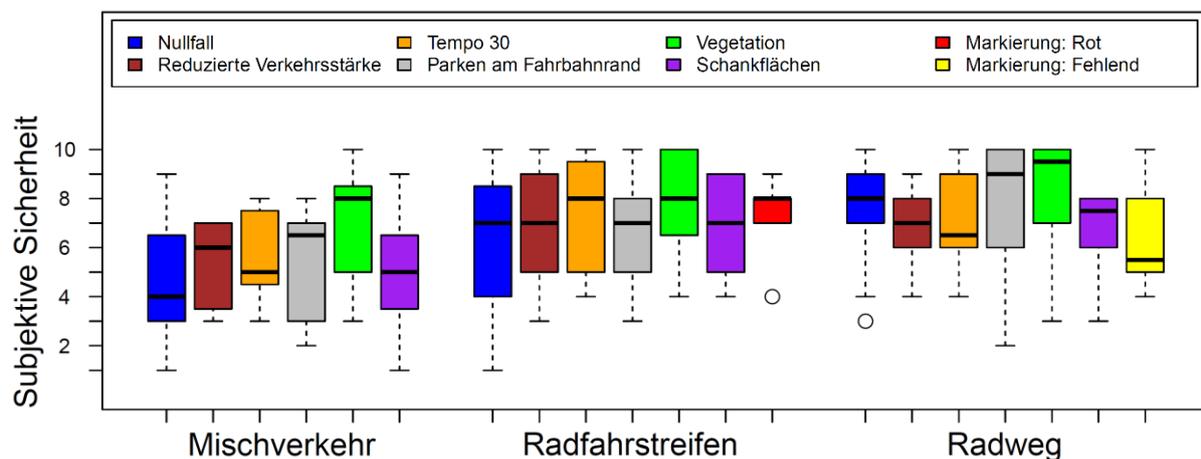


Abbildung 12: Subjektive Sicherheit in allen Szenarien

Vergleicht man die drei Nullfälle (blau), ist zu erkennen, dass sich die Probanden beim Fahren im Mischverkehr auf der Fahrbahn am unsichersten fühlten (durchschnittlich 4,5 Sicherheitspunkte). Der Radfahrstreifen wurde durchschnittlich mit 6,7 bewertet, während der Radweg mit 7,7 Punkten angesichts der subjektiven Sicherheit am besten abschnitt. Unter den

³² vgl. Klein (2008)

³³ vgl. Bundesministerium für Verkehr (1998): 16

Parametern im Mischverkehr weist die Vegetation (grün) den größten signifikanten Unterschied zum Nullfall 1 auf ($p=0,002$). Hier erhöhte sich das durchschnittliche Sicherheitsempfinden um 2,2 Punkte (von 4,5 auf 6,7). Weiterhin erhöhte die Geschwindigkeitsreduzierung auf Tempo 30 (orange) signifikant die subjektive Sicherheit im Mischverkehr ($p=0,048$). Auf dem Radfahrstreifen und Radweg sind diese Effekte nicht zu erkennen. Bei ersterem führte lediglich die Roteinfärbung des Streifens (rot) zu einer signifikanten Erhöhung des Sicherheitsempfindens im Vergleich zur weißen Begrenzungslinie ohne Farbe ($p=0,002$). Die farbliche Hervorhebung der für den Radverkehr ausgewiesenen Infrastruktur scheint die Radfahrer in ihrer Position zu stärken und das Gefühl zu vermitteln, sie werden beim Überholen noch besser von den Autofahrern wahrgenommen. Beim Radweg hingegen hatte kein Parameter einen signifikanten Einfluss auf die subjektive Sicherheit. Es zeigt sich zwar bei der fehlenden Markierung (gelb) eine Reduzierung des Sicherheitsempfindens, jedoch ist dieser Unterschied nicht signifikant ($p=0,076$). Hier war aber auffällig, dass dies vor allem auf Personen, die im Alltag kein Rad fahren, zutraf, während für Alltagsradler diese Änderung kaum Auswirkungen auf das Sicherheitsgefühl hatte. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass (Viel-)Radfahrer den Fahrweg auch ohne Leitlinie kontrollieren können und die Situation, sich den Seitenraum mit den Fußgängern teilen zu müssen, aus der Praxis kennen. Entgegen der Annahme, dass parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand (grau) die subjektive Sicherheit durch die Gefahr von *Dooring*-Unfällen³⁴ erhöhen, ist bei der Bewertung im Mischverkehr und am Radweg sogar eine Steigerung im Sicherheitsempfinden zu erkennen. Wenngleich diese nicht signifikant ist, lässt das Ergebnis vermuten, dass die parkenden Fahrzeuge für Radfahrer im Seitenraum eine Art Schutz vor dem fließenden Verkehr darstellen, der offenbar die größere Gefahr ist. Im Mischverkehr, wo das Risiko von *Dooring*-Unfällen größer ist, kann dieses Argument nicht herangezogen werden. Da allerdings nur 60 % der Probanden im Mischverkehr die parkenden Fahrzeuge wahrgenommen hatten, ist das Ergebnis hier generell zu hinterfragen.

Bei der Bewertung der Attraktivität des städtebaulichen Umfelds fällt auf, dass sich diese durch die Vegetation (grün) nicht nur mehr im Mischverkehr wie bei der subjektiven Sicherheit, sondern auf allen drei Führungsformen signifikant erhöhte ($p=0,000$). In Abbildung 13 ist der vergleichsweise große Effekt durch den Grünstreifen am Fahrbahnrand deutlich zu sehen. Weiterhin erhöhte sich die Attraktivität für die befragten Probanden durch die Aufenthalts- und Restaurantflächen (lila), die mit einer belebteren Erdgeschossnutzung einhergehen. Auch hier ist der signifikante Unterschied auf allen Führungsformen zu erkennen ($p=0,044$ im Mischverkehr bzw. $p=0,004$ jeweils am Radfahrstreifen und Radweg). Im Mischverkehr erhöhte die Geschwindigkeitsreduzierung auf Tempo 30 (orange) nicht nur die subjektive Sicherheit, sondern auch die Attraktivität ($p=0,027$). Hingegen für die Probanden, die eine

³⁴ Verkehrsunfall, bei dem ein Radfahrer in eine unerwartet vom Fahrer geöffnete Autotür einfährt

eigene Infrastruktur wie den Radfahrstreifen oder den baulich getrennten Radweg hatten, spielte die Kfz-Geschwindigkeit keine nennenswerte Rolle hinsichtlich der Attraktivität.

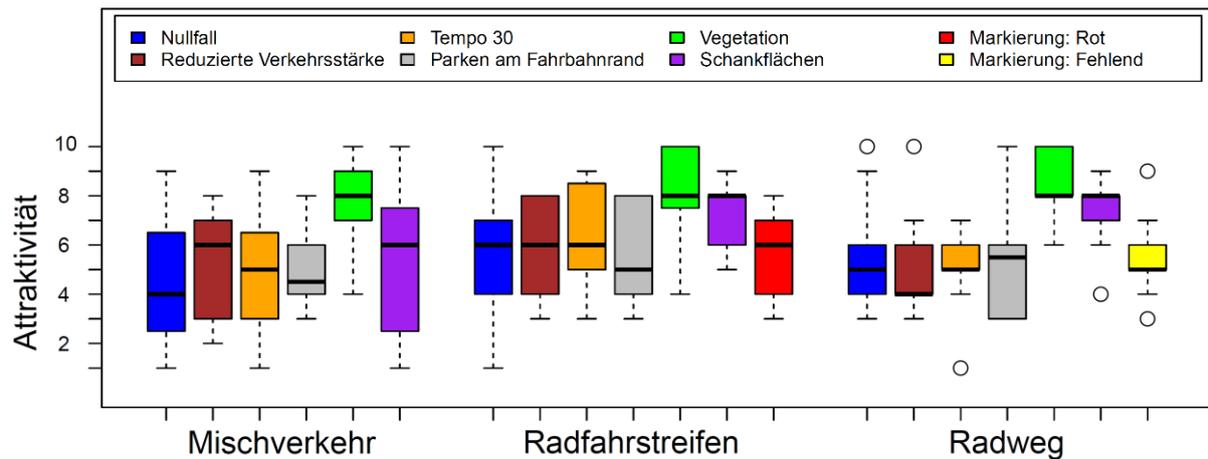


Abbildung 13: Attraktivität des städtebaulichen Umfelds in allen Szenarien

Die von den Probanden angegebene Bereitschaft auf den jeweiligen Streckenabschnitten Rad zu fahren, wurde in Abbildung 14 von der verbalisierten Skala (vgl. Anhang X) in eine Ordinalskala umgewandelt, sodass der Wert 1 die geringste und der Wert 6 die höchste Bereitschaft ausdrückt. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Bewertung der subjektiven Sicherheit bzw. Attraktivität. Auf allen drei Führungsformen sorgte die Vegetation für eine erhöhte Bereitschaft. Im Mischverkehr wird in allen anderen Szenarien „eher ungern“ Rad gefahren, während entlang des Grünstreifens „eher gern“ gefahren wird. Am Radfahrstreifen und Radweg ist derselbe Effekt zu erkennen. Hier wird aber grundsätzlich „eher gern“ gefahren und entlang des Grünstreifens bereits eine „hohe“ Bereitschaft angegeben. Beim Radfahrstreifen sorgt zudem die Roteinfärbung für eine bessere Bewertung.

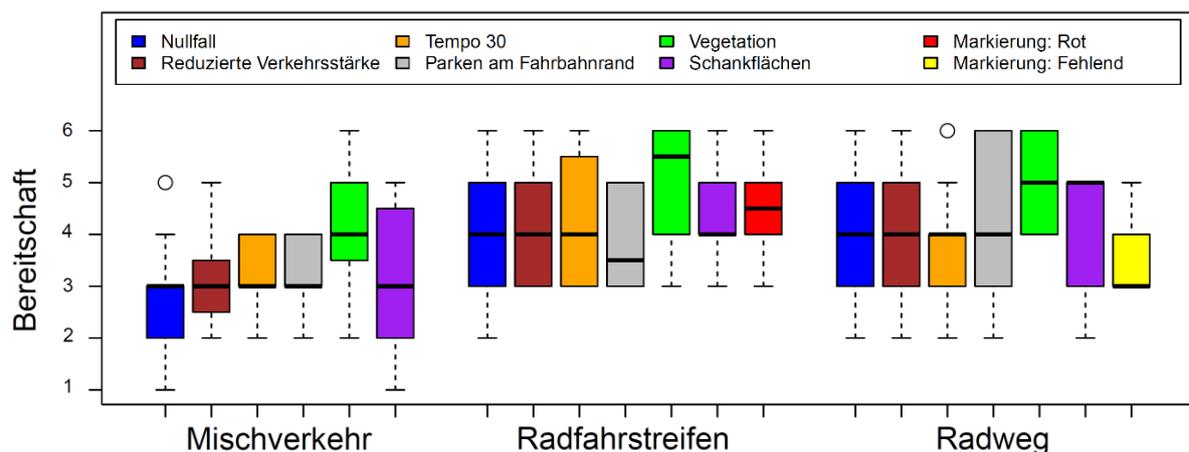


Abbildung 14: Bereitschaft Rad zu fahren in allen Szenarien

Am Ende des Fragebogens sollten die Probanden ihre zurückgelegte Strecke sowie ihre Fahrtzeit abschätzen. Während bei der Strecke keine Auffälligkeiten zu erkennen waren, konnte bei der Fahrtzeit ein signifikanter Unterschied zwischen den Schätzungen im Nullfall und bei Tempo 30 bzw. bei der Vegetation festgestellt werden. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Abweichungen zwischen geschätzter und tatsächlich verstrichener Fahrtzeit. Liegt die Abweichung über einem Wert von Null bedeutet das, dass die Fahrtzeit überschätzt wurde. Negative Abweichungen drücken unterschätzte Fahrtzeiten aus. Bei der eingezeichneten Linie in den Diagrammen (Abweichung=0) entspricht die geschätzte Fahrtzeit der tatsächlich gefahrenen.

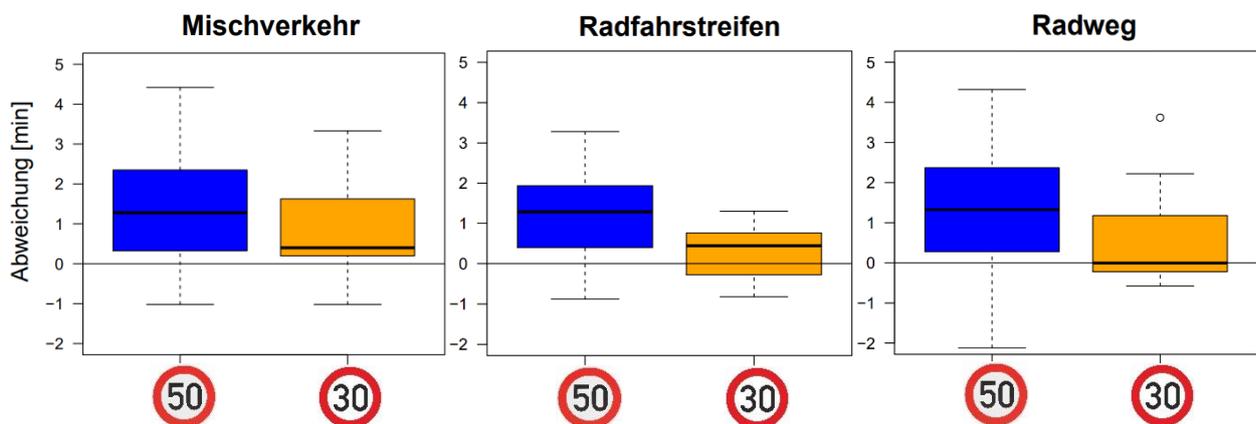


Abbildung 15: Abweichung zwischen geschätzter und tatsächlicher Fahrtzeit (Nullfall - Tempo 30)

Bei Tempo 30 schien für die Probanden die Zeit schneller zu vergehen als bei Tempo 50. Da hier die Radfahrer – zumindest im Vergleich zu den Autos – das Gefühl haben schneller zu sein, wird möglicherweise auch die aufgewendete Zeit als kürzer wahrgenommen.

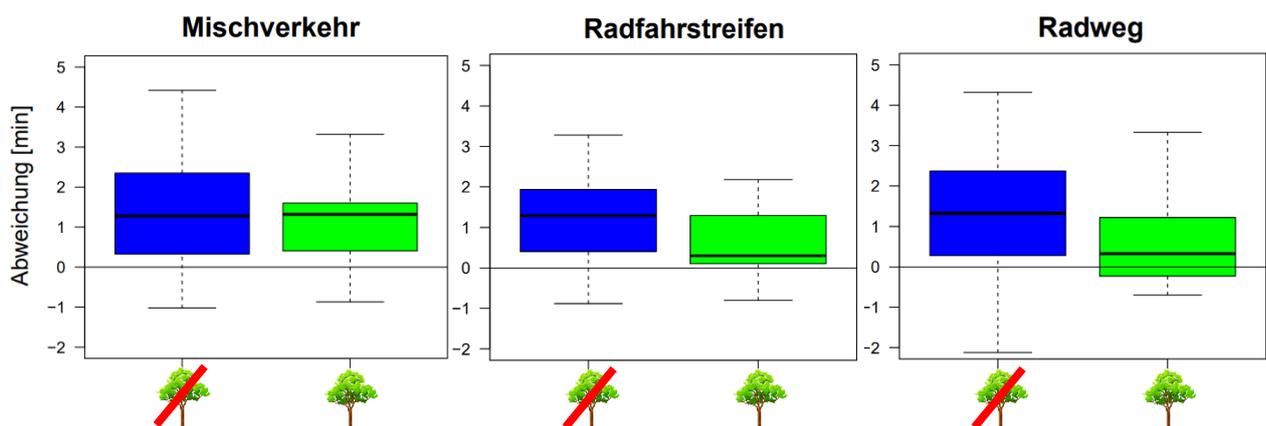


Abbildung 16: Abweichung zwischen geschätzter und tatsächlicher Fahrtzeit (Nullfall - Vegetation)

Derselbe Effekt zeigt sich bei der Vegetation: Wenn die Fahrt von Straßengrün begleitet wurde hatten die Probanden das Gefühl die Zeit verginge schneller. Zu einer vergleichbaren Erkenntnis kam auch KNOFLACHER, der in empirischen Untersuchungen nachgewiesen hat, dass das Zeitempfinden von Verkehrsteilnehmern vom Umfeld eines Weges abhängt. „Eine

als schön empfundene Umgebung dehnt die Zeit weniger als eine unattraktive.“³⁵ Da in der vorliegenden Untersuchung die Vegetation auch als deutlich attraktiver bewertet wurde als der Nullfall, kann diese Aussage bestätigt werden. Insgesamt ist aber auch zu erkennen, dass fast alle Abweichungen über dem Wert Null liegen. Das heißt, die Fahrzeit im Fahrradsimulator wurde generell überschätzt. Ob das in der Realität auch der Fall ist oder dies mit der Simulation zusammenhängt, muss noch geprüft werden.

6 Zusammenfassung

Im Zuge der anhaltenden Verdichtung des städtischen Raums durch Flächennutzung für Wohnbebauung und Verkehr steigen auch die Anforderungen an die urbane Mobilität: Schnell, flexibel und kostengünstig wollen immer mehr Menschen auf dem begrenzten Verkehrsraum von A nach B kommen. Gleichzeitig müssen Gesundheits- und Umweltschäden im Zuge des Klimawandels reduziert werden, indem nachhaltige Mobilitätsformen gefördert werden. Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht, wie diese Förderungen im Radverkehr aussehen können und wie wirksam sie sind. Hierfür wurden verkehrliche und städtebauliche Einflussfaktoren entlang eines in VR simulierten Streckenabschnitts aus der Praxis variiert. Zusätzlich wurde zwischen drei Führungsformen unterschieden: Fahren im Mischverkehr mit dem Kfz-Verkehr (keine Radverkehrsinfrastruktur), markierter Radfahrstreifen auf der Fahrbahn und baulich getrennter Radweg. Insgesamt wurde der Streckenabschnitt von 93 Probanden auf einem Fahrradsimulator unter Laborbedingungen durchfahren und anschließend hinsichtlich der subjektiven Sicherheit, Attraktivität und Bereitschaft Rad zu fahren bewertet. Weiterhin wurden die zurückgelegte Fahrstrecke und Fahrtzeit geschätzt. In der durchgeführten Versuchsanordnung konnte festgestellt werden, dass Straßenbegleitgrün die höchste Wirksamkeit hinsichtlich der drei genannten Bewertungskriterien hatte. Weitere Einflussfaktoren waren eine Geschwindigkeitsreduzierung von Tempo 50 auf Tempo 30 beim Fahren im Mischverkehr und die Roteinfärbung des Bodenbelags am Radfahrstreifen, die jeweils für ein erhöhtes Sicherheitsempfinden sorgten. Eine fehlende Begrenzungslinie, die den Radweg vom Gehweg trennt, verunsicherte hingegen die Probanden. Abgesehen vom Straßengrün erhöhten auch Restaurants- und Aufenthaltsflächen die Attraktivität entlang des Streckenabschnitts, was allerdings auch mit einem reduzierten Sicherheitsempfinden einherging. Durch die veränderte Erdgeschossnutzung entstanden mehr Konfliktpunkte mit Passanten, die diese Bewertung erklären könnten. Ausgehend von diesem Ergebnis ist anzunehmen, dass eine erhöhte Attraktivität nicht automatisch auch die

³⁵ Knoflacher (1987): 63 f.

subjektive Sicherheit erhöht. Weitere Faktoren, wie die Kfz-Verkehrsstärke oder parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand zeigten keine signifikanten Auswirkungen auf die Bewertung der Fahrt. Diese Ergebnisse vermitteln einen erstmaligen Eindruck, welche kausalen Zusammenhänge im Radverkehr vorliegen und welche Maßnahmen signifikante Verbesserungen bzw. Verschlechterungen bewirken können. Nicht alle erfordern eine bauliche Änderung, für die der notwendige Verkehrsraum und / oder die finanziellen Mittel oft fehlen. Auch durch Beschilderungen (hier wird eine Befolgung der Verkehrsregeln vorausgesetzt) und Bodenmarkierungen kann das Sicherheitsempfinden der Radfahrer erhöht werden. Trotz der realistischen Abbildung des Straßenzugs und der Kalibrierung des Fahrradsimulators muss der Transfer der Erkenntnisse in die reale Umgebung noch empirisch validiert werden.

7 Weiterer Forschungsbedarf

In einem weiteren Schritt sollen die dargelegten Forschungsergebnisse verallgemeinert und Handlungsempfehlungen für Städte abgeleitet werden. Es wird angestrebt diese bei geeigneten Konferenzen einzureichen, vorzustellen und zu veröffentlichen.

Sofern finanzielle Mittel verfügbar sind, soll die geplante Untersuchung im Fußgängerverkehr analog zur Fahrradstudie erfolgen. Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt, gibt es lediglich eine Führungsform für den Fußgängerverkehr, wodurch weniger Szenarien entstehen und damit eine geringere Anzahl an Probanden notwendig sein wird. Besonderes Augenmerk soll hier auf der anfänglichen Kalibrierung und auf frühzeitigen Pretests in Bezug auf motion sickness liegen. Im Nachgang sind die Ergebnisse der Fahrradstudie gegenüberzustellen. Hier sollen Aussagen darüber getroffen werden, wie Fußgänger ihre Umgebung im Vergleich zu Radfahrern wahrnehmen.

Nach Abschluss der Untersuchungen liegt der Fokus auf der weiteren Optimierung der eingesetzten Messinstrumente. Bereits durch die Benutzerstudie mit dem Fahrradsimulator konnte das Forschungsteam ein umfangreiches Feedback sammeln, das Schwachstellen aufzeigte. Eine große Herausforderung liegt nach wie vor in der Umsetzung einer realistischen Kurvenfahrt. Ein weiterer Punkt sind die zahlreichen Widerstände, denen der Verkehrsteilnehmer beim realen Radfahren ausgesetzt ist. Die Simulation des Anfahrwiderstands oder das „Auslaufen“ des Fahrrads sind nur zwei Aspekte von vielen, die in Zukunft genauer untersucht werden sollen. Hierzu sind weitere Messungen im Feld sowie die Aufnahme von Bewegungsabläufen notwendig.

8 Literaturverzeichnis

- Auda, J. et al. (2019): Around the (Virtual) World: Infinite Walking in Virtual Reality Using Electrical Muscle Stimulation, in: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 431
- Bialkova, S. et al. (2018): Urban future: Unlocking Cycling with VR Applications, in: *IEEE Workshop on Augmented and Virtual Realities for Good (VAR4Good)*, S. 1–5.
- Bozgeyikli, E. et al. (2019): Locomotion in virtual reality for room scale tracked areas, in: *International Journal of Human-Computer Studies*. 122, S. 38–49.
- Bundesministerium für Verkehr (1998): Lärmschutz im Verkehr, 2. Aufl., Bonn.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) (2016): Der Faktor Zeit im Radverkehr. Daten, Fakten und Maßnahmen zur Beschleunigung des Radverkehrs. Wien.
- Buttussi, F.; Chittaro, L. (2019): Locomotion in Place in Virtual Reality: A Comparative Evaluation of Joystick, Teleport, and Leaning, in: *IEEE transactions on visualization and computer graphics*.
- Chen, C.-K. et al. (2007): Study of Interactive Bike Simulator in Application of Virtual Reality, in: *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 28, 6, S. 633-640.
- Cherni, H. et al. (2020): Literature review of locomotion techniques in virtual reality, in: *International Journal of Virtual Reality*, 20, 1, S. 1-20.
- Colombet, F. et al. (2016): Motion sickness comparison between a CAVE and a HMD, in: *Proceedings of the Driving Simulation Conference 2016 Europe*. Paris, S. 201–206.
- Cykyria (2021): VR Treadmills Review: Comparing KAT Walk Mini vs. Cyberith Virtualizer Elite 2 vs. Virtuix Omni. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t25LG5P323Y> (18.02.22).
- Dialynas, G. et al. (2019): Design and hardware selection for a bicycle simulator, in: *Mechanical Sciences*. 10, 1, S. 1–10.
- FixMyCity (2020): Studie zur subjektiven Sicherheit im Radverkehr. Ergebnisse und Daten einer Umfrage mit über 21.000 Teilnehmenden. URL: <https://fixmyberlin.de/research/subjektive-sicherheit> (04.02.22).
- Funk, M. et al. (2019): Assessing the Accuracy of Point & Teleport Locomotion with Orientation Indication for Virtual Reality using Curved Trajectories, in: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 147.
- Geršak, G. et al. (2020): Effect of VR technology maturity on VR sickness, in: *Multimedia Tools and Applications*. 79, 21, S. 14491–14507.
- Keler, A. et al. (2018): A bicycle simulator for experiencing microscopic traffic flow simulation in urban environments, in: *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 3020–3023.
- Kipke, H.; Ullmann, D. (2021): Modellprojekte für den Radverkehr in Bayern. Forschungsbericht der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, NCT – intelligente Verkehrsplanung. Endbericht. Nürnberg.
- Klein, C. (2008): Lärmreduzierung und andere Wirkungen durch Geschwindigkeitsbeschränkungen. TU Darmstadt.
- Knoflacher, H. (1987): Verkehrsplanung für den Menschen. Wien.

- Kreimeier, J. et al. (2020): Initial Evaluation of Different Types of Virtual Reality Locomotion Towards a Pedestrian Simulator for Urban and Transportation Planning, in: *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, 68:1–68:6.
- Moudon, A.V. et al. (2005): Cycling and the built environment, a US perspective, in: *Transportation Research Part D*, 10, S. 245-261.
- Nazemi, M. et al. (2019): Studying cyclists' behavior in a non-naturalistic experiment utilizing cycling simulator with immersive virtual reality. FCL, Singapore ETH Centre.
- Razzaque, S. et al. (2002): Redirected Walking in Place, in: *Proceedings of EUROGRAPHICS*, 9, S. 105–106.
- Schramka, F. et al. (2018): Development of virtual reality cycling simulator, in: *Journal of Computers*. 13, 6, S. 603–615.
- Schulzyk, O. et al. (2009): A real bicycle simulator in a virtual reality environment: the FIVIS project, in: *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*. Berlin, Heidelberg, S. 2628–2631.
- Ullmann, D. et al. (2020): BikeVR: A virtual reality bicycle simulator towards sustainable urban space and traffic planning, in: *Proceedings of Mensch und Computer, MuC '20*, Association for Computing Machinery. New York, S. 511–514.
- Wendel-Vos, G.C.W. et al. (2004): Factors of the physical environment associated with walking and bicycling, in: *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36, 4, S. 725-730.
- Wahlgren, L.; Schantz, P. (2012): Exploring bikeability in a metropolitan setting: stimulating and hindering factors in commuting route environments, in: *BMC Public Health*, 12:168.
- Winters, M. et al. (2010): How far out of the way will we travel? Built environment influences on route selection for bicycle and car travel?, in: *Journal of the Transportation Research Board*, 2190, S. 1-10.

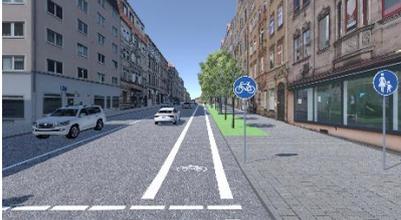
Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: zu untersuchende Parameter</i>	12
<i>Tabelle 2: Im Modell untersuchte Führungsformen</i>	13
<i>Tabelle 3: Übersicht der auswertbaren Fragebögen</i>	20

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Untersuchungsablauf</i>	3
<i>Abbildung 2: Fußgängersimulator (links), Fahrradsimulator (rechts) mit VR-Umgebung (unten)</i>	7
<i>Abbildung 3: Funktionsprinzip der Fahrrad- und Fußgängersimulation</i>	8
<i>Abbildung 4: Streckenabschnitt Schwabacher Straße</i>	9
<i>Abbildung 5: Straßenquerschnitt im Nullfall 1</i>	11
<i>Abbildung 6: Virtuelles Fahrrad (links); reales Fahrrad (rechts)</i>	14
<i>Abbildung 7: Teststrecke für Probefahrt</i>	14
<i>Abbildung 8: Modellvarianten Mischverkehr</i>	15
<i>Abbildung 9: Verändertes Setup ohne VR-Brille nach Pretests (Fotos: Ullmann)</i>	17
<i>Abbildung 10: Boxplot-Erklärung (Quelle: Eigene Darstellung nach Cleff 2015)</i>	21
<i>Abbildung 11: Wahrnehmung der Veränderungen auf unterschiedlichen Führungsformen</i>	22
<i>Abbildung 12: Subjektive Sicherheit in allen Szenarien</i>	23
<i>Abbildung 13: Attraktivität des städtebaulichen Umfelds in allen Szenarien</i>	25
<i>Abbildung 14: Bereitschaft Rad zu fahren in allen Szenarien</i>	25
<i>Abbildung 15: Abweichung zwischen geschätzter und tatsächlicher Fahrzeit (Nullfall - Tempo 30)</i>	26
<i>Abbildung 16: Abweichung zwischen geschätzter und tatsächlicher Fahrzeit (Nullfall - Vegetation)</i> ...	26

Modellvarianten Radfahrstreifen

Nullfall - Radfahrstreifen	Reduzierte Verkehrsstärke um 30 %	Reduzierte Kfz- Geschwindigkeit (30 km/h)
		
Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	Grünstreifen mit Bäumen am Fahrbahnrand	Restaurants und Schankflächen am Fahrbahnrand
		
Rot markierter Radfahrstreifen		
		

Modellvarianten Radweg

Nullfall - Radweg	Reduzierte Verkehrsstärke um 30 %	Reduzierte Kfz- Geschwindigkeit (30 km/h)
		

Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	Grünstreifen mit Bäumen am Fahrbahnrand	Restaurants und Schankflächen am Fahrbahnrand
		

Gemeinsamer Geh- und Radweg ohne Markierung


Gruppeneinteilung

		Gruppe 1A	Gruppe 1B	Gruppe 1C
1: Mischverkehr	Nullfall 1	x	x	x
	Kfz-Verkehrsbelastung			x
	Kfz-Geschwindigkeit		x	
	Parksituation	x		
	Vegetation	x		x
	Schankflächen		x	
		Gruppe 2A	Gruppe 2B	Gruppe 2C
2: Radfahrstreifen	Nullfall 2	x	x	x
	Kfz-Verkehrsbelastung		x	
	Kfz-Geschwindigkeit	x		
	Parksituation		x	
	Vegetation	x		
	Roteinfärbung			x
	Schankflächen			x
		Gruppe 3A	Gruppe 3B	Gruppe 3C
3: Radweg	Nullfall 3	x	x	x
	Kfz-Verkehrsbelastung		x	
	Kfz-Geschwindigkeit	x		
	Parksituation		x	
	Vegetation	x		
	fehlende Markierung			x
	Schankflächen			x

Interner Fragebogen (Ausfüllen durch Befragenden)

Angaben zur Person

Name _____

Geschlecht weiblich männlich divers

Alter _____

Erfahrung mit VR ja nein

Probleme mit Schwindel ja nein

Bevorzugtes Verkehrsmittel im Alltag PKW Öffis Rad zu Fuß

Angaben zum Untersuchungsfall

1A 1B 1C

2A 2B 2C

3A 3B 3C

Angaben zu Motion Sickness

Wie haben Sie sich während der Fahrt gefühlt?

Probefahrt _____

Nullfall _____ Auswertung der Daten: ja nein

Parameter 1 _____ Auswertung der Daten: ja nein

Parameter 2 _____ Auswertung der Daten: ja nein

Nach der Fahrt:

Kam Ihnen der Abschnitt bekannt vor?

Nein vage bekannt richtige Straßenbezeichnung

Sind Sie damit einverstanden, wenn wir Sie für eine Anschluss-Studie wieder kontaktieren?
Allerdings wird es sich hierbei um einen reinen Online-Fragebogen handeln.

ja nein

Probanden-Fragebogen Gruppe 1A (eigenständiges Ausfüllen durch Probanden)

Fahrt 1:



Bitte bewerten Sie Ihre virtuelle Fahrt:

Stellen Sie sich bei der Beantwortung der nachfolgenden Fragen vor, Sie wären die Straße in der Realität abgefahren.

1. Wie **sicher** haben Sie sich bei der Fahrt entlang der Straße gefühlt?

Bitte stufen Sie Ihr Sicherheitsgefühl auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unsicher

sehr sicher

<input type="checkbox"/>									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2. Wie **attraktiv** fanden Sie die Straße und das Umfeld der Straße?

Bitte stufen Sie die Attraktivität der Straße und des Umfelds der Straße auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unattraktiv

sehr attraktiv

<input type="checkbox"/>									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

3. Würden Sie hier **gerne Radfahren**?

Bitte stufen Sie Ihre Bereitschaft auf dieser Straße Rad zu fahren ein.

Auf keinen
Fall

nein

eher
ungern

eher
gern

ja

auf jeden
Fall

<input type="checkbox"/>					
--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

4. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **gefallen**?

5. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **nicht gefallen**?

6. Wenn Sie an die zurückliegende virtuelle Fahrt denken:

Wie viele **Meter** – schätzen Sie – haben Sie bei Ihrer virtuellen Fahrt zurückgelegt? _____ Meter

Wie viele **Minuten** – schätzen Sie – haben Sie sich durch das virtuelle Stadtmodell bewegt? _____ Min

Fahrt 2:

Bitte bewerten Sie Ihre virtuelle Fahrt:

Stellen Sie sich bei der Beantwortung der nachfolgenden Fragen vor, Sie wären die Straße in der Realität abgefahren.

1. Sind Ihnen Änderungen aufgefallen?

ja nein

Wenn ja, welche?

2. Wie **sicher** haben Sie sich bei der Fahrt entlang der Straße gefühlt?

Bitte stufen Sie Ihr Sicherheitsgefühl auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unsicher

sehr sicher

 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. Wie **attraktiv** fanden Sie die Straße und das Umfeld der Straße?

Bitte stufen Sie die Attraktivität der Straße und des Umfelds der Straße auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unattraktiv

sehr attraktiv

 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

4. Würden Sie hier **gerne Radfahren**?

Bitte stufen Sie Ihre Bereitschaft auf dieser Straße Rad zu fahren ein.

Auf keinen
Fall

nein

eher
ungern

eher
gern

ja

auf jeden
Fall

5. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **gefallen**?
-

6. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **nicht gefallen**?

7. Wenn Sie an die zurückliegende virtuelle Fahrt denken:

Wie viele **Meter** – schätzen Sie – haben Sie bei Ihrer virtuellen Fahrt zurückgelegt? _____ Meter

Wie viele **Minuten** – schätzen Sie – haben Sie sich durch das virtuelle Stadtmodell bewegt? _____ Min

Fahrt 3:

Bitte bewerten Sie Ihre virtuelle Fahrt:

Stellen Sie sich bei der Beantwortung der nachfolgenden Fragen vor, Sie wären die Straße in der Realität abgefahren.

1. Sind Ihnen Änderungen aufgefallen?

ja nein

Wenn ja, welche?

2. Wie **sicher** haben Sie sich bei der Fahrt entlang der Straße gefühlt?

Bitte stufen Sie Ihr Sicherheitsgefühl auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unsicher

sehr sicher

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. Wie **attraktiv** fanden Sie die Straße und das Umfeld der Straße?

Bitte stufen Sie die Attraktivität der Straße und des Umfelds der Straße auf einer Skala von 1 bis 10 ein.

sehr unattraktiv

sehr attraktiv

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

4. Würden Sie hier **gerne Radfahren**?

Bitte stufen Sie Ihre Bereitschaft auf dieser Straße Rad zu fahren ein.

Auf keinen
Fall

nein

eher
ungern

eher
gern

ja

auf jeden
Fall

5. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **gefallen**?
-

6. Was hat Ihnen bei der Fahrt entlang der Straße **nicht gefallen**?

7. Wenn Sie an die zurückliegende virtuelle Fahrt denken:

Wie viele **Meter** – schätzen Sie – haben Sie bei Ihrer virtuellen Fahrt zurückgelegt? _____ Meter

Wie viele **Minuten** – schätzen Sie – haben Sie sich durch das virtuelle Stadtmodell bewegt? _____ Min