
Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator mit besonderer Berücksichtigung von Senioren als Radfahrer

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Mensch und Sicherheit Heft M 347

Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator mit besonderer Berücksichtigung von Senioren als Radfahrer

von

Martina Suing

Bundesanstalt für Straßenwesen

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Mensch und Sicherheit Heft M 347

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 4319002
Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator mit
besonderer Berücksichtigung von Senioren als Radfahrer

Referat:
Grundlagen des Verkehrs- und Mobilitätsverhaltens

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53 | Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9315 | ISBN 978-3-95606-791-4 | <https://doi.org/10.60850/bericht-m347>

Bergisch Gladbach, August 2024

Kurzfassung - Abstract

Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator mit besonderer Berücksichtigung von Senioren als Radfahrer

In der vorliegenden Machbarkeitsstudie werden die ersten experimentellen Erfahrungen mit dem Fahrradsimulator der BAST berichtet. Für die Untersuchung kam ein statischer Fahrradsimulator, der ebenfalls wie die Simulatorsoftware SILAB vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) entwickelt worden ist, zum Einsatz. Da Senioren aufgrund ihrer steigenden Mobilität bei zugleich erhöhter Vulnerabilität als Fahrradfahrer in der Verkehrssicherheitsforschung eine wichtige Zielgruppe darstellen, wurden sowohl Fahrradfahrer ab einem Alter von 65 Jahren (Experimentalgruppe: EG), als auch – aufgrund der bis dato kaum vorhandenen Erfahrungen mit dem Fahrradsimulator – vergleichend Probanden im Alter von 25–50 Jahren (Kontrollgruppe: KG), in die Studie miteinbezogen.

Ziel der Studie ist es, grundsätzliches Wissen über die Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen zum Einsatz von Fahrradsimulatoren für Verhaltensbeobachtungen zu gewinnen und darzustellen. Neben der eigentlichen Testfahrt, die in einem komplexeren Stadtszenario stattfand, wurden auch die drei vorausgehenden Übungsfahrten zur Eingewöhnung an den Fahrradsimulator evaluiert. Zur Datengewinnung kamen neben der Verhaltensbeobachtung (Versuchsleitersicht/Fremdurteil) und der Fahrdatenaufzeichnung (Geschwindigkeitsmessung) mehrere Fragebögen (Probandensicht/Selbsturteil) zum Einsatz.

Die Stichprobe umfasst in der EG 35 ältere Radfahrer (Altersspanne: 65–89 Jahre; MW = 72,43 Jahre/65,7 % männlich; 34,3 % weiblich) und in der KG 31 Radfahrer einer mittleren Altersgruppe (Altersspanne: 25–50 Jahre; MW = 38,42 Jahre/48,4 % männlich; 51,6 % weiblich). Elf Probanden aus der EG sind den älteren Senioren mit einem Alter von mindestens 75 Jahren zuzurechnen. Die Auswertungen des Vorher-Fragebogens mit Fragen zum realen Fahrverhalten ergaben alterstypische Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsgruppen: Die älteren Radfahrer bezeichneten sich im Vergleich zu den Probanden der KG als langsamere und vorsichtigeren Fahrradfahrer, die risikoreichere Fahrbedingungen meiden. Allerdings gaben die älteren Probanden häufiger an, regelmäßig längere Radtouren über 20 km zu unternehmen. Der Anteil der Probanden mit Vorerfahrungen im Pkw-Fahrsimulator war in der EG niedriger als in der KG.

Die Abbruchrate (= Drop-out-Rate) unterscheidet sich zwischen den beiden Untersuchungsgruppen erheblich. Etwa die Hälfte der Senioren ($n = 18$) brach die Studie vorzeitig ab; bei den älteren Senioren (≥ 75 Jahre) beträgt die Drop-out-Rate sogar 72,7 % ($n = 8$). Dagegen haben nur 2 Probanden (6,5 %) der KG ihre Teilnahme vorzeitig beenden müssen. Die Hälfte der älteren Probanden brach bereits während der ersten, kurzen Übungsfahrt ab; v. a. aufgrund von Problemen mit dem Handling des Fahrradsimulators. Abbrüche, die erst während der Testfahrt vorgenommen wurden, fanden aufgrund von Unverträglichkeit (Simulatorkrankheit) statt.

Beim Vergleich der übrigen Studien-Completer (EG: $n = 17$; KG: $n = 29$) zeigt sich, dass die Fahrperformanz der Probanden der EG im Vergleich zu denen der KG im Fremdurteil (aber nicht im Selbsturteil) insgesamt schlechter bewertet wurde. Viele Senioren wiesen ein unsicheres Fahrverhalten auf (auch aufgrund von Problemen mit dem Handling des Fahrradsimulators) und sind im Durchschnitt deutlich langsamer gefahren als die Probanden der KG. Die Gesamtanzahl der Fahrfehler war dagegen in beiden Completer-Gruppen relativ hoch, was zumindest in Teilen auf die noch optimierbare Fahrdynamik zurückgeführt wird. Rein deskriptiv überwogen in der EG Fahrfehler wie das unabsichtliche Verlassen der

Fahrbahn, falsches Abbiegen sowie das Auslassen des Handzeichens. Bei den Probanden der KG konnten demgegenüber mehr Kollisionen und mehr Vorfahrtsfehler beobachtet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Probanden der KG aufgrund ihrer höheren Fahrgeschwindigkeit mehr kritischen Verkehrsszenen ausgesetzt waren als die Probanden der EG. Schließlich ist positiv zu erwähnen, dass die Studie erste Hinweise für eine gelungene Immersion (= ‚Eintauchen in die virtuelle Welt‘) liefern kann.

Für zukünftige Studien werden zwei Ansatzpunkte als besonders aussichtsreich gesehen, um die hohe Drop-out-Rate bei den Senioren zu reduzieren. Zum einen könnte ein umfangreicheres Eingewöhnungstraining mit einem langsameren und systematischeren Aufbau des Schwierigkeitsgrades den Bedürfnissen der Senioren besser gerecht werden. Hierbei wird empfohlen, sich zunächst auf die Gruppe der jüngeren Senioren (65–74 Jahre) zu konzentrieren. Zum anderen könnte eine weitere Optimierung der Fahrdynamik hinsichtlich der Lenkung, Bremsung und Geschwindigkeit die Drop-out-Rate durch einen geringeren Adaptionsbedarf verringern. Erste Lösungsansätze hierzu können bereits aufgezeigt werden. Für zukünftige experimentelle Verkehrssicherheitsstudien ist es erforderlich, dass zunächst eine systematische Validierung durch Vergleiche mit Realfahrten erfolgt.

Bicycle simulator study with older adults: feasibility study

This feasibility study reports on the first experimental experiences with the BAST bicycle simulator. A static bicycle simulator was used for the study, which was developed by the Würzburg Institute for Traffic Sciences (Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften, WIVW), as well as the SILAB simulator software. Older cyclists represent an important target group in road safety research due to their increasing mobility and, at the same time, increased vulnerability. For this reason both cyclists aged 65 and over (experimental group: EG) and, by way of comparison, middle-aged test subjects aged 25–50 (control group: CG) were included in the study.

The aim of the study is to gain and present basic knowledge about the prerequisites, possibilities and limitations for the use of the bicycle simulator for behavioural observations. In addition to the actual test ride taking place in a quite complex urban scenario, the three preceding practice rides used to help participants become familiar with the bicycle simulator were also evaluated. For data collection, several questionnaires (subject's view/self-assessment) were used in addition to behavioural observation (observer's view/external assessment) and recording of cycling (speed measurement).

The sample comprised 35 older cyclists in the EG (age range: 65–89 years; M = 72.43 years/65.7% male; 34.3% female) and 31 middle-aged cyclists in the CG (age range: 25–50 years; M = 38.42 years/48.4% male; 51.6% female). Eleven subjects from the EG are 75 years of age and older. The evaluation of the pre-questionnaire containing questions on real cycling behaviour reveal age-typical differences between the two study groups: compared to the middle-aged, the older cyclists described themselves as slower and more cautious cyclists who avoid riskier cycling conditions. However, the older subjects more often stated that they regularly undertook longer cycling trips over 20 km. The proportion of subjects with prior experience in the car driving simulator was lower in the EG than in the CG.

The drop-out rate differs considerably between the two study groups. About half of the older subjects (n = 18) broke off the study prematurely; among the oldest subjects (≥ 75 years), the drop-out rate even amounted to 72.7% (n = 8). In contrast, only 2 middle-aged

subjects (6.5%) had to drop out of the study prematurely. Half of the older subjects already dropped out during the first, short practice ride; mainly due to problems with handling the bicycle simulator. Drop-outs as late as during the test ride were due to intolerance (simulator sickness).

The comparison of the left study completers (EG: n = 17; CG: n = 29) shows that the cycling performance of the EC subjects was rated worse in the external assessment (but not in the self-assessment) than that of those in the CG. Many older subjects showed an unsafe cycling behaviour (also due to problems with the handling of the bicycle simulator) and on average rode significantly slower than the subjects of the CG. The total number of cycling errors, on the other hand, was relatively high in both completer groups, which is attributed at least in part to the cycling dynamics that can still be optimized. Cycling errors such as unintentionally drifting out of the lane, making wrong turning, and omitting the hand signal predominated in the EG. In contrast, more collisions and more right-of-way errors were observed in the subjects of the CG. Thereby it should be taken into account that the subjects of the CG were exposed to more critical traffic scenes than the subjects of the EG due to their higher cycling speed. Finally, on a positive note, the study can provide initial indications of successful 'immersion in the virtual world'.

For future studies, two approaches are expected to reduce the high drop-out rate among the older subjects. On the one hand, a more comprehensive familiarisation training with a slower and more systematic build-up of the level of difficulty could better meet the needs of the older subjects. It is recommended to first concentrate on the group of older subjects between 65 to 74 years. On the other hand, further optimisation of the simulated cycling dynamics with regard to steering, braking and speed could reduce the drop-out rate by minimising the need for adaptation. The first approaches to solving this problem can already be demonstrated. For future experimental road safety studies, it is necessary to first carry out a systematic validation study through comparison with real cycling behaviour.

Inhalt

1	Einführung	9
2	Fahrradfahren im Seniorenalter	11
2.1	Unfallbeteiligung, Fehlverhalten und Fahrfehler	11
2.2	Pedelegs: Nutzung und Unfallbeteiligung	13
2.3	Fahrsicherheit bei altersbedingten, gesundheitlichen Beeinträchtigungen	13
2.4	Kompensationsverhalten	15
3	Verhaltensbeobachtung mit Simulatoren	17
3.1	Vorteile	17
3.2	Herausforderungen und Probleme	17
3.2.1	Validität von Simulatoren	17
3.2.2	Simulatorkrankheit	19
3.3	Senioren als Zielgruppe	20
3.4	Fahrradsimulatorprojekte in Deutschland	21
4	Ziele der Studie	23
5	Methodisches Vorgehen	24
5.1	Fahrradsimulator und Fahrsimulatorsoftware	24
5.2	Probandenrekrutierung	27
5.3	Ablauf der Untersuchung	28
5.3.1	Einführungsgespräch	29
5.3.2	Erläuterung des Mockups	29
5.3.3	Nachträgliche notwendige Anpassungen der Versuchsanordnung	30
5.4	Streckendesign	31
5.4.1	Erste Übungsstrecke (Landstrecke)	31
5.4.2	Zweite Übungsstrecke (Fahrradparcours)	32
5.4.3	Dritte Übungsstrecke (Kurze Stadtstrecke)	33

5.4.4	Teststrecke	34
5.5	Instrumente und Methoden zur Datenerhebung	36
5.5.1	Basis-Daten aus der Datenbank des Probanden-Pools	37
5.5.2	Teilnehmer-Fragebögen	37
5.5.3	Verhaltensbeobachtung, -einschätzung und -dokumentation	40
5.5.4	Automatische Datenaufzeichnung durch SILAB	41
5.6	Statistische Analysen	42
6	Ergebnisse	43
6.1	Stichprobenbeschreibung	43
6.1.1	Basisdaten	43
6.1.2	Probandenbeschreibung (Selbsturteil)	44
6.2	Drop-outs versus Completer	50
6.2.1	Drop-out-Rate in Abhängigkeit der Simulator-Vorerfahrung	52
6.2.2	Drop-out-Rate in Abhängigkeit von Gesundheit und Wohlbefinden	53
6.3	Ergebnisse der vier Simulatorfahrten im Verlauf	54
6.3.1	Simulatorkrankheit (Selbst- und Fremdurteil)	54
6.3.2	Einschätzung der Fahrperformanz im Fahrradsimulator (Fremdurteil)	57
6.3.3	Fahrerleben mit dem Fahrradsimulator (Selbsturteil)	59
6.4	Ergebnisse der Testfahrt	61
6.4.1	Geschwindigkeitsvergleich (SILAB-Daten)	61
6.4.2	Fahrfehler und -unsicherheiten (Fremdurteil)	62
6.4.3	Fahrerleben (Selbsturteil)	64
6.5	Bewertung des Fahrradsimulators (Selbsturteil)	66
7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	69
7.1	Ausgangsbedingungen der Probanden der EG und KG im Vergleich	69
7.2	Drop-out-Rate und Simulatorkrankheit	72
7.3	Fahrverhalten im Fahrradsimulator	74
7.3.1	Bewährung des Eingewöhnungstrainings	75
7.3.2	Fahrverhalten auf der Teststrecke	76
7.3.3	Selbst- vs. Fremdeinschätzung	76
7.4	Validitätseinschätzung (Augenscheinvalidität)	77
7.5	Methodische Einschränkungen der vorliegenden Arbeit	79
7.6	Fazit und Ausblick	80

Literatur	84
Bilder	91
Tabellen	93
Anhang	94

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einführung

Während sich Fahrverhaltensbeobachtungen mit Pkw-Fahrsimulatoren in der Verkehrssicherheitsforschung bereits etabliert haben, liegen zum Einsatz von Fahrradsimulatoren bisher nur wenige publizierte Forschungsergebnisse vor. Vielmehr sind diese ersten Forschungsprojekte mit Fahrradsimulatoren noch durch ihren Pioniercharakter gekennzeichnet. Mit der vorliegenden Arbeit stellt die Bundesanstalt für Straßenwesen ihre ersten experimentellen Erfahrungen mit ihrem Fahrradsimulator vor, der vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) entwickelt worden ist. Als Mockup dient ein „reales“ mit Sensorik ausgestattetes Trekkingrad, das auf einer passiv leicht beweglichen Trägerplatte statisch angebracht ist. Die virtuelle Umgebung wird über zehn Großformat-Displays mit einem 300° Horizontal- und einen 100° Vertikal-Sichtbereich dargestellt.

Die hier vorgestellte Machbarkeitsstudie liefert erste Erkenntnisse zu den grundsätzlichen Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen zum Einsatz des Fahrradsimulators für Fahrverhaltensbeobachtungen. Dies betrifft die Gestaltung des Eingewöhnungstrainings, des beobachteten Fahrverhaltens mit dem Fahrradsimulator und Probleme mit der Verträglichkeit (Simulatorkrankheit). Darüber hinaus wurden erste subjektive Einschätzungen zur Validität des Fahrradsimulators sowie der simulierten Verkehrsumgebung im Sinne einer Augenscheinvalidität erhoben.

Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die spezifische Zielgruppe der Senioren geworfen, die aufgrund ihrer steigenden Mobilität mit dem Fahrrad bei zugleich hoher Vulnerabilität für die Verkehrssicherheitsforschung von besonderem Interesse ist. So sind Senioren bei Fahrradunfällen mit schweren Verletzungsfolgen überproportional vertreten. Mehr als die Hälfte der im Jahr 2019 getöteten Fahrradfahrer war 65 Jahre oder älter (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b).

In einer vorausgehenden Studie mit dem Pkw-Fahrsimulator der BAST, der ebenfalls vom WIVW zusammen mit der Fahrsimulatorsoftware SILAB entwickelt worden ist, konnte gezeigt werden, dass auch mit Senioren Fahrverhaltensbeobachtungen im Simulator durchgeführt werden können (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Bei dieser wie auch bei einer weiteren Studie (MAAG et al., 2021) stellte sich zudem heraus, dass die älteren Fahrer eine sehr heterogene Fahrperformanz zeigten, die im Durchschnitt im Vergleich zu den jüngeren Fahrern geringer ausfiel. Ein Vergleich der beobachteten Fahrperformanz im Simulator mit der im Realverkehr ergab hohe Korrelationen, was für den diagnostischen Wert von (Pkw-) Simulatorfahrten zur Identifikation älterer Fahrer mit beeinträchtigter Fahrkompetenz spricht.

Mit der vorliegenden Studie sollte nun erstmalig geprüft werden, ob und falls ja, inwiefern sich auch ein Fahrradsimulator zur Verhaltensbeobachtung bei Senioren (ab 65 Jahren) eignet. Hierzu wurden vergleichend Probanden einer mittleren Altersgruppe (25–50 Jahren) gegenübergestellt. Ein Vergleich der Abbruchrate (= Drop-out-Rate), der Verträglichkeit und des beobachteten und berichteten Fahrverhaltens zwischen diesen beiden Gruppen liefert dazu erste Hinweise. Da aus dem Bereich der experimentellen Simulatorforschung bisher keine Studie bekannt ist, die sich explizit mit der Eignung von Fahrradsimulatoren für Senioren befasst, soll mit dieser Studie ein erster Anfang gemacht werden.

Die Arbeit beginnt in Kapitel 2 mit der Beschreibung von Besonderheiten beim Fahrradfahren im Seniorenalter. Hier sind zum einen altersspezifische Unfalldaten und Fahrfehler zu benennen, als auch alterstypische gesundheitliche Beeinträchtigungen und beobachtetes Kompensationsverhalten. In Kapitel 3 werden die Vorteile sowie die besonderen Heraus-

forderungen von Verhaltensbeobachtungen mit Simulatoren erläutert. Zudem wird auf die spezifische Zielgruppe der Senioren sowie auf aktuelle Fahrradsimulatorprojekte in Deutschland eingegangen. Die Ziele der Studie werden in Kapitel 4 dargestellt, bevor in Kapitel 5 das methodische Vorgehen – inkl. Beschreibung des Fahrradsimulators der BAST, Probandenrekrutierung, Ablauf der Untersuchung, Streckendesign sowie die Darstellung der verwendeten Instrumente und Methoden zur Datenerhebung – erläutert wird. In Kapitel 6 werden die Erfahrungen und Ergebnisse dieser ersten Studie mit dem Fahrradsimulator der BAST präsentiert, die schließlich im Kapitel 7 zusammenfassend diskutiert werden.

2 Fahrradfahren im Seniorenalter

Senioren – hier definiert als Personen ab dem vollendeten 65. Lebensjahr – stellen in der Verkehrssicherheitsforschung eine wichtige Zielgruppe dar, da aufgrund des demografischen Wandels ihr Anteil in der Bevölkerung stetig wächst und ihre Mobilität mit dem Fahrrad – wie auch mit dem Pkw – zugleich zunimmt (SCHUBERT et al., 2018). Im Folgenden wird an mehreren Stellen zwischen jüngeren und älteren Senioren differenziert, wobei unter jüngeren Senioren Personen im Alter von 65 bis 74 Jahren und unter älteren Senioren Personen ab 75 Jahren verstanden werden.

Gemäß den Erhebungen der Studie Mobilität in Deutschland (MiD) hat die täglich zurückgelegte Fahrradstrecke bei der aktuellsten Erhebung aus dem Jahr 2017 im Vergleich zu 2002 in allen Altersgruppen zugenommen (NOBIS, 2019). Querschnittlich betrachtet nimmt bei Senioren mit zunehmendem Alter die zurückgelegte Tagesstrecke mit dem Fahrrad jedoch grundsätzlich ab: Während die tägliche Fahrradfahrdistanz bei 35–55-jährigen ca. 1,6 km beträgt, fahren 70-jährige nur noch ca. 1,3 km und 80-jährige ca. 0,8 km pro Tag. Ebenfalls reduziert sich im Seniorenalter der Anteil der regelmäßigen Radfahrer: So nutzen bei den 60–69-jährigen noch ca. 51 % das Fahrrad mindestens einmal im Monat, bei den 70–79-jährigen sind es noch 40 % und bei den über 80-jährigen nur noch 21 %. Dennoch beträgt der durchschnittliche Anteil der zurückgelegten Wege mit dem Fahrrad bei den älteren Radfahrern im Alter von 60–79 Jahren – genauso wie den 20–59-jährigen Radfahrern – immer noch 10–11 %. Auch bei den über 80-jährigen liegt der Wegeanteil mit dem Fahrrad immerhin noch bei 8 %.

Mit dem Eintritt ins Rentenalter entfällt i. d. R. der Weg zur Arbeit als Wegezweck. Das Fahrrad wird von Senioren insbesondere für Freizeitwege, Einkäufe und Erledigungen genutzt (INFAS, DLR, IVT UND INFAS 360, 2018). Aus diesem Grund stellen gesundheitliche Aspekte und Transportmöglichkeiten für Senioren wichtige Motive für das Fahrradfahren dar. Jüngere Radfahrer nennen demgegenüber vor allem Umwelt- und Bequemlichkeitsaspekte (STEFFENS et al., 1999).

2.1 Unfallbeteiligung, Fehlverhalten und Fahrfehler

Im Jahr 2020 verunglückten in Deutschland insgesamt 92.273 Fahrradfahrer (einschl. Pedelecfahrer). Fast jeder fünfte verunglückte Fahrradfahrer (18,7 %) war 65 Jahre und älter (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021a)¹, wobei der Bevölkerungsanteil von Senioren im Jahr 2020 bei 22 % lag. Allerdings ist für Senioren seit den 1980er Jahren das bevölkerungsbezogene Risiko, im Straßenverkehr mit dem Fahrrad zu verunglücken, um 96,9 % gestiegen (zu Fuß: - 73,4 %; mit dem Pkw: - 5,6 %) (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b). Diese Entwicklung dürfte u. a. mit der gestiegenen Exposition zusammenhängen (s. o.). Das bevölkerungsbezogene Risiko, bei einem Fahrradunfall getötet zu werden, ist jedoch auch für Senioren in den letzten 40 Jahren gesunken; wenn auch nicht im gleichen Maße wie bei den unter 65-jährigen. Deshalb ist der Anteil von Senioren unter den tödlich ver-

¹ Bei den dargestellten Unfallzahlen des Statistischen Bundesamtes ist zu berücksichtigen, dass hier lediglich polizeilich erfasste Unfälle berücksichtigt werden, die im öffentlichen Straßenraum stattgefunden haben. Es wird davon ausgegangen, dass ca. 70 % aller Fahrradunfälle in der amtlichen Unfallstatistik nicht abgebildet sind (VON BELOW, 2016). Insbesondere Alleinunfälle scheinen meistens nicht polizeilich erfasst zu werden. So beträgt gemäß einer Befragungsstudie die Rate der Alleinunfälle 66 % (HAGEMEISTER UND TEGEN-KLEBINGAT, 2011). Zudem findet die Mehrheit der Unfälle den eigenen Angaben zufolge abseits der Fahrbahn (61 %) statt (s. a. (SCHLEINITZ et al., 2015).

unglückten Radfahrern gestiegen. Im Jahr 2020 waren von den 426 tödlich verunglückten Fahrradfahrern mehr als die Hälfte (58,9 %) 65 Jahre oder älter (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b). In Bezug auf die Einwohnerzahl sind sie damit deutlich überrepräsentiert, was die stark erhöhte Vulnerabilität von älteren Fahrradfahrern widerspiegelt. Das heißt, ältere Radfahrer haben zwar in Bezug auf ihre Einwohnerzahl (ohne Berücksichtigung der niedrigeren Exposition von Senioren, s. o.) kein erhöhtes Risiko, einen Unfall zu erleben. Bei einem erlebten Unfall jedoch ist das Risiko für Senioren, eine schwere Verletzung zu erleiden, aufgrund ihrer altersbedingten körperlichen Verfassung deutlich erhöht. Wie auch unter den jüngeren Fahrradfahrern (< 65 Jahre) überwiegt unter den tödlich verunglückten Senioren der Anteil von Männern (= 73,7 %). Jeder zweite tödlich verunglückte Radfahrer im Seniorenalter war mit einem Pedelec (s. Kapitel 2.2) unterwegs (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021a).

Bezogen auf alle Unfälle mit beteiligten Radfahrern waren Radfahrer in 49,4 % aller Fälle die Hauptverursacher; bei den Senioren liegt der Anteil der Hauptverursacher bei 52,6 % (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b). 27,7 % aller polizeilich angezeigten Radunfälle mit Personenschaden waren Alleinunfälle (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021a). Bei Fahrradunfällen mit Personenschaden wurde die Kategorie „falsche Straßenbenutzung“² als häufigstes Fehlverhalten von Radfahrern aller Altersgruppen (11,8 % der Unfallbeteiligten) festgestellt. Altersunterschiede zeigen sich v. a. bei Verhaltensweisen, die indirekt für ein risikofreudigeres Fahrverhalten sprechen könnten. So werden bei Radfahrern einer mittleren Altersgruppe (25–65 Jahre) im Vergleich zu Radfahrern ab 65 Jahren häufiger eine nicht angepasste Geschwindigkeit sowie das Fahren unter Alkoholeinfluss festgestellt. Bei älteren Radfahrern überwiegen dagegen Fehler der Kategorie „Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren, Ein- und Anfahren“ sowie „Vorfahrt/Vorrang gewähren“, d. h. eher in komplexen Verkehrssituationen sowie auch Alleinunfälle.

In einer umfangreichen Studie zu älteren Menschen als Radfahrer wurden aufwendig das Fahrkönnen, die Fahrfertigkeiten und das Verkehrsverhalten – u. a. auch in komplexen Verkehrssituationen – untersucht (STEFFENS et al., 1999). Die Studie ergab, dass ältere Radfahrer (ab 65 Jahre) im Durchschnitt ein disziplinierteres und kompensatorischeres (d. h. an altersbedingte Beeinträchtigungen angepasstes) Fahrverhalten zeigen als jüngere Fahrer (< 65 Jahre). Auffällig war allerdings, dass sich bei einer kleinen Untergruppe von Senioren Probleme in der Fahrzeugbeherrschung bei einer generell langsameren Fahrweise feststellen ließen, insbesondere beim Aufsteigen und beim Anfahren. Diese Fahrprobleme nahmen mit der Komplexität des Verkehrsgeschehens zu. So ließ sich beobachten, dass sich diese besonders gefährdete Subgruppe z. B. beim Abbiegen kaum des rückwärtigen Verkehrs versicherte und nur selten ein Handzeichen beim Linksabbiegen gab. Auch wenn die genannten Probleme relativ selten auftraten, waren sie jedoch häufig genug, um sie regelmäßig festzustellen. Des Weiteren wurde bei den älteren Senioren im Vergleich zu den jüngeren Senioren doppelt so viele konflikthafte Begegnungen beobachtet. Diese besonders gefährdete Subgruppe zeichnete sich dabei interessanterweise nicht durch besondere gesundheitliche Beeinträchtigungen aus, als eher durch ein weniger sicherheitsbezogenes Fahrverhalten.

² Die Kategorie „falsche Straßenbenutzung“ umfasst Fehlverhaltensweisen wie z. B. die unerlaubte Nutzung von Gehwegen oder Fußgängerzonen, unerlaubtes Nebeneinanderfahren, die Nicht-Benutzung eines benutzungspflichtigen Radwegs sowie die Nutzung eines Radweges in nicht zugelassener Richtung.

2.2 Pedelecs: Nutzung und Unfallbeteiligung

Eine Besonderheit bei Fahrradfahrern im Seniorenalter ist der hohe Nutzungsanteil von Pedelecs: 11 % aller Seniorenhaushalte sind im Besitz eines oder mehrerer Pedelecs (NOBIS, 2019). Die Hälfte aller Wege, die mit einem Pedelec gefahren werden, legen Radfahrer im Alter von 60 Jahren und älter zurück. Nach einer groß angelegten Online-Befragung aus dem Jahr 2018 liegt das Durchschnittsalter von Pedelecfahrern bei 56,7 Jahren, wobei 38,3 % mindestens 65 Jahre alt sind (PLATHO et al., 2021). Da mit Pedelecs einfachere höhere Geschwindigkeiten erreicht werden können, stellt sich die Frage nach der nutzungsabhängigen Verkehrssicherheit von Pedelecs. Gemäß einer naturalistischen Fahrstudie wird mit einem Pedelec zwar schneller gefahren als mit einem konventionellen Fahrrad, der Unterschied erweist sich jedoch als relativ gering (SCHLEINITZ et al., 2014). Eigenen Angaben zufolge fährt die Hälfte der Pedelecfahrer maximal nur 20 km/h, obwohl grundsätzlich eine Tretunterstützung bis 25 km/h erfolgt (PLATHO et al., 2021). Einen größeren Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit scheint das Alter der Fahrer zu haben: So fahren ältere Radfahrer mit einem Pedelec langsamer als jüngere Fahrer mit einem konventionellen Fahrrad (SCHLEINITZ et al., 2014). Allerdings steigen mit einem Pedelec die zurückgelegten Tagesdistanzen im Vergleich zu konventionellen Fahrrädern in allen Altersklassen um 4–8 km an (NOBIS, 2019). Eine Analyse der GIDAS-Unfalldaten (German in-depth accident study) mit einer Stichprobe von n = 218 Pedelecfahrern im Vergleich zu n = 7.884 Fahrern konventioneller Fahrräder ergab, dass Pedelecfahrer häufiger bei Fahrnfällen und somit häufiger an (geraden) Strecken und ohne Beteiligung eines weiteren Verkehrsteilnehmers verunglücken (PLATHO et al., 2021). Unter diesen verunglückten Pedelecfahrern konnte allerdings kein altersbezogener Unterschied nachgewiesen werden.

2.3 Fahrsicherheit bei altersbedingten, gesundheitlichen Beeinträchtigungen

Der Prozess des Alterns ist sehr individuell, weshalb inter- und intraindividuelle Leistungsunterschiede in Bezug auf verschiedenen Fähigkeits- und Fertigungsbereiche oft sehr erheblich sind (POSCHADEL et al., 2012; SCHUBERT et al., 2018). Auf Basis des Lebensalters allein lassen sich deshalb für den Einzelnen keine Vorhersagen über seine Fahrfähigkeiten und -fertigkeiten machen.

Für die Gesamtgruppe der älteren Personen lässt sich allerdings feststellen, dass mit dem Alter der Anteil von Personen mit Erkrankungen sowie gesundheitlichen Einschränkungen zunimmt (INFAS, DLR, IVT UND INFAS 360, 2018; SCHUBERT et al., 2018). Zwei Drittel der mindestens 60-jährigen und fast alle Menschen im Alter von mindestens 70 Jahren leiden an mindestens einer Erkrankung, in vielen Fällen auch an mehreren Erkrankungen (HOLTE & ALBRECHT, 2004). Multimorbidität steht wiederum im Zusammenhang mit einem erhöhten Unfallrisiko. Häufig genannte Erkrankungen sind v. a. Herzerkrankungen, Bluthochdruck und Schlafstörungen. Fast jeder Zweite im Alter von mindestens 60 Jahren ist zudem in seiner Beweglichkeit eingeschränkt.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass mit der Anzahl von Erkrankungen die Wahrscheinlichkeit einer Medikamenteneinnahme einhergeht, die sich wiederum auf die Fahrfähigkeit auswirken kann. So nehmen 45,3 % der 65–74-jährigen und 63,4 % der Senioren im Alter von 75 Jahren und älter mindestens ein Medikament ein (HOLTE, 2018). In einer Studie von RUDISILL et al. (2016) konnte gezeigt werden, dass 15 von 35 untersuchten Medikamenten ein erhöhtes Unfallrisiko mit sich bringen (vgl. SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018).

In der MiD-Studie von 2017 wurde der Anteil von Personen ermittelt, der von gesundheitlichen Einschränkungen betroffen ist wie z. B. Seh- und Gehbehinderungen. Demgemäß ist im Alter von 60–70 Jahren jeder Fünfte von gesundheitlichen Einschränkungen betroffen, bei den über 80-jährigen ist es etwa die Hälfte. Zugleich nimmt auch der Anteil der Personen zu, der durch diese gesundheitlichen Einschränkungen in der Mobilität beeinträchtigt ist. Bei den Senioren im Alter von 70 Jahren und älter sind ca. zwei Drittel bis drei Viertel der gesundheitlich Betroffenen auch in ihrer Mobilität beeinträchtigt. Über alle Altersgruppen hinweg führen v. a. Sehbehinderungen in ca. der Hälfte der Fälle zu Mobilitätseinschränkungen. Gehbehinderungen sind in einem Drittel der Fälle mit Mobilitätseinschränkungen verbunden.

SCHUBERT et al. (2018) sowie SCHUMACHER und SCHUBERT (2018) haben eine umfassende Literaturübersicht zu altersbedingten sensorischen, kognitiven und motorischen Leistungseinbußen zusammengestellt, die hinsichtlich ihrer Relevanz bzgl. der Fahrsicherheit diskutiert werden. An dieser Stelle soll deshalb nur auf die wichtigsten Forschungsergebnisse tabellarisch hingewiesen werden (Tabelle 1):

Bereich	Veränderung im Alter	Auswirkung auf fahrrelevante Fähigkeiten
Visuelle Fähigkeiten	Verkleinerung des Durchmessers der Pupille und der Elastizität der Linse sowie Verlangsamung der Akkommodation; Verdichtung der Linsenfasern im Linsenkern: Geringere Lichtdurchlässigkeit sowie erhöhte Streuung des Lichtes; Abnahme der Stäbchendichte in der Retina; Erschlaffung des Augenlids und Zurücksinken des Augapfels in die Augenhöhle	Beeinträchtigung des Sehens bei ungünstigen Lichtverhältnissen wie z. B. Verlangsamung der Dunkeladaption, erhöhte Blendempfindlichkeit und Kontrastminderung; verringerte Sehschärfe im Nahbereich; verlangsamtes Erkennen von Objekten; Verkleinerung der Gesichtsfeldgröße.
Auditive Fähigkeiten	Ca. 40 % der Personen \geq 65 Jahre sind schwerhörig (insbesondere bei hohen Frequenzen).	Schwierigkeiten beim Wahrnehmen von akustischen Reizen. Einseitige Schwerhörigkeit führt zu einer Beeinträchtigung des räumlichen Hörvermögens und damit der Lokalisierung von akustischen Reizen.
Kognitive Fähigkeiten	Teilweise Beeinträchtigungen der Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit als auch der Aufmerksamkeitsleistung; hierbei Differenzierung zwischen selektiver, geteilter, visuell-räumlicher Aufmerksamkeit sowie Daueraufmerksamkeit und Vigilanz. Weitere fahrrelevante, kognitive Funktionen mit altersbedingten Leistungseinbußen sind: Exekutive Funktionen, inhibitorische Systeme, Kurzzeitgedächtnis und das nutzbare Sehfeld. Die verschiedenen kognitiven Prozesse bedingen sich gegenseitig.	Die kognitive Leistungsfähigkeit ist insbesondere bei komplexen, sich schnell/häufig verändernden und unerwarteten Verkehrssituationen relevant, wie v. a. an Kreuzungen und beim Linksabbiegen. Eine verlangsamte Reaktion, ein Übersehen von verkehrsrelevanten Reizen oder eine Fehleinschätzung der Verkehrssituation (u. a. Geschwindigkeitseinschätzung) können die Unfallgefahr erhöhen.
Motorische Fähigkeiten	Abnahme der Muskelmasse, der Kraft, der Bewegungsgeschwindigkeit und der Beweglichkeit (z. B. der Halswirbelsäule)	Abnahme der Greif- und Beinkraft, Verlangsamung der Bremsausübung, eingeschränkte Kopfbewegungen z. B. beim Schulterblick.
Gleichgewichtsregulation	Gradueller Verlust der Gleichgewichtsfähigkeit (IOSA et al., 2014)	Die Gleichgewichtsregulation ist v. a. beim Auf- und Absteigen sowie beim Anfahren bzw. beim Fahren mit langsamen Geschwindigkeiten und beim Lenken (u. a. mit Gewichtsverlagerung) relevant.

Tab. 1: Altersbedingte Leistungsveränderungen und ihre mögliche Auswirkung auf fahrrelevante Fähigkeiten

Obwohl einige Studien Hinweise dafür gefunden haben, dass sich altersbedingte Beeinträchtigungen auf das Fahrverhalten und das Unfallrisiko auswirken, ist die Studienlage insgesamt uneinheitlich (SCHUBERT et al., 2018; SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018; WELLER et al., 2015). Viele dieser Studien beziehen sich zudem auf das Autofahren und nicht

auf das Fahrradfahren. Forschungsergebnisse zum Zusammenhang von altersbedingten Beeinträchtigungen und Radfahrerunfällen sind noch sehr lückenhaft und zum Teil widersprüchlich. Eine Auswertung von GIDAS-Unfalldaten ergab beispielsweise keinen nennenswerten Altersunterschied in Bezug auf visuelle Wahrnehmungsfehler, die bei jedem vierten Unfall von haupt- bzw. alleinschuldigen Radfahrern berichtet wurden, v. a. beim Einfahren in den fließenden Verkehr (PLATHO et al., 2016). Auch ließ sich kein Zusammenhang zwischen (nicht angemessen korrigierten) Sehbeeinträchtigungen und visuellen Wahrnehmungsfehlern feststellen. Akustische Wahrnehmungsfehler wurden zum Unfallhergang nie berichtet, auch wenn akustische Reize für Radfahrer vermutlich relevanter sind (v. a. zur Kontrolle des rückwärtigen Verkehrs) als z. B. für Autofahrer. Allerdings wurden bei einzelnen Radfahrern mit Hörbeeinträchtigung mehr als doppelt so viele visuelle Wahrnehmungsfehler in der Unfallhergangsbeschreibung genannt als bei Radfahrern ohne Hörbeeinträchtigung. Die aufmerksamkeitsleitende Funktion von akustischen Reizen könnte ein möglicher Grund hierfür sein.

Das Radfahren unterscheidet sich vom Autofahren allerdings nicht nur in der Nutzung von visuellen und akustischen Reizen. So ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die motorische Leistungsfähigkeit auf das Radfahren einen wesentlich bedeutsameren Einfluss hat als auf das Autofahren. Neben der Tretkraft ist z. B. auch das Anzeigen eines Abbiegevorgangs mittels Handzeichen oder das Beobachten des rückwärtigen Verkehrs ohne Nutzung eines Rückwärtsspiegels motorisch herausfordernder als beim Autofahren (ENGBERS et al., 2014). Hinzu kommt, dass neben der Muskelkraft die Gleichgewichtsregulation beim Radfahren ganz besonders gefordert ist (siehe Kapitel 3.2.1). Viele Senioren zeigen Schwierigkeiten bei der Gleichgewichtsregulation (GRANACHER et al., 2014) und ein Zusammenhang zum Unfallrisiko beim Fahrradfahren erscheint zumindest plausibel (v. a. bei Alleinunfällen wie beim Auf- und Absteigen), wenn auch – soweit bekannt – bisher nicht wissenschaftlich nachgewiesen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass altersbedingte Einschränkungen zu verminderten Radfahrfähigkeiten und -fertigkeiten und zu einer erhöhten Unfallgefahr führen können, aber nicht müssen. Viele Senioren reduzieren ihr Unfallrisiko durch kompensatorisches Fahrverhalten (STEFFENS et al., 1999).

2.4 Kompensationsverhalten

Im Vergleich zu Kindern profitieren Senioren i. d. R. von ihren langjährigen Erfahrungen im Straßenverkehr und können so altersbedingte Defizite (zumindest teilweise) kompensieren (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Schwierigkeiten bereiten allerdings v. a. unerwartete komplexe Verkehrssituationen, die eine schnelle Informationsaufnahme und -verarbeitung sowie motorische Reaktion erfordern. Um solche Verkehrssituationen zu vermeiden, zeigen ältere Radfahrer kompensatorische Verhaltensweisen wie ein deutlich langsames und vorsichtigeres Fahrverhalten (POSCHADEL et al., 2012; SCHUBERT et al., 2018). Auch in Bezug auf die bevorzugte Infrastruktur gibt es Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Radfahrern (< 65 Jahre versus ≥ 65 Jahre): Ältere Radfahrer bevorzugen Radwege und Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen sowie verbotenerweise auch Gehwege eher als jüngere und vermeiden somit die unmittelbare Nähe zu anderen Fahrzeugen, insbesondere zum (dichten) Verkehr (STEFFENS et al., 1999). In einer Befragungsstudie gaben 39 % der älteren Radfahrer an, sich auf einer viel befahrenen Straße als Radfahrer (sehr) unsicher zu fühlen (HAGEMEISTER & TEGEN-KLEBINGAT, 2011). Ein zu hohes Verkehrsaufkommen oder ein zu schneller Verkehr werden als häufigste Gründe dafür genannt, anstelle der Straße auf dem Gehweg zu fahren (83 % der älteren Radfahrer). Ebenfalls vermeiden viele älteren

Radfahrer das Fahren bei schlechteren Witterungsbedingungen sowie bei Dunkelheit (SCHUBERT et al., 2018; VON BELOW, 2016).

Eine weitere Art der Kompensation stellt die Vermeidung ablenkender Nebentätigkeiten während der Fahrt dar. So geben Senioren im Alter ab 80 Jahren seltener an, während der Fahrradfahrt mit ‚Dingen zu hantieren‘ und sich mit anderen zu unterhalten als Senioren im Alter von 60–69 Jahren (HAGEMEISTER & TEGEN-KLEBINGAT, 2011). Ebenfalls wird die Nutzung eines Smartphones bei Senioren über 65 Jahren während des Fahrens deutlich seltener beobachtet als bei jüngeren Radfahrern (EVERS et al., 2022; FUNK et al., 2021).

Abschließend kann resümiert werden, dass Senioren als Radfahrer eine spezifische Zielgruppe in der Verkehrssicherheitsforschung darstellen, die sich v. a. durch ihre erhöhte Vulnerabilität auszeichnet. Umso mehr ist es wichtig, für Radfahrer im Seniorenalter risikoarme Untersuchungsmethoden zur Verhaltensbeobachtung einzusetzen. Simulatorstudien stellen aus diesem Grund eine interessante Alternative zu Verhaltensbeobachtungen im Realverkehr dar. Auf diesen Aspekt soll im folgenden Kapitel näher eingegangen werden.

3 Verhaltensbeobachtung mit Simulatoren

Experimentelle Studien mit Simulatoren bringen gegenüber Untersuchungen im Realverkehr viele Vorteile mit sich (Kapitel 3.1). Jedoch sind mit Simulatorstudien auch eine Reihe von speziellen Herausforderungen und Problemen verbunden (Kapitel 3.2), wie die Validität der Untersuchungsergebnisse (Kapitel 3.2.1) und damit zusammenhängend das spezielle Problem der Simulatorkrankheit (Kapitel 3.2.2). Die meisten Erkenntnisse zu Verhaltensbeobachtungen mit Simulatoren beruhen auf Studien mit Pkw-Fahrsimulatoren, was auch für die Zielgruppe der Senioren zutrifft (Kapitel 3.3). Demgegenüber hat die Forschung mit Fahrradsimulatoren noch Pioniercharakter (Kapitel 3.2.1 und 3.4).

3.1 Vorteile

Untersuchungen im Simulator bieten einige Vorteile gegenüber Untersuchungen im Realverkehr (BLANA, 1996; CAIRD & HORREY, 2011). So sind Testfahrten im realen Straßenverkehr untereinander nur eingeschränkt vergleichbar, da sich die Verkehrsbedingungen im fließenden Verkehr zwischen verschiedenen Fahrten auf derselben Strecke oft beträchtlich unterscheiden. Zudem können unfallträchtige Verkehrssituationen, die für die Verkehrssicherheitsforschung vom besonderen Interesse sind, im Realverkehr nicht untersucht werden. Dagegen können im Simulator verschiedene Anforderungen an den Fahrer wie kritische Verkehrssituationen und z. T. auch Witterungsbedingungen (z. B. Dunkelheit und Nebel) ohne reales Unfallrisiko und unter experimentell standardisierten Bedingungen hergestellt und jederzeit reproduziert werden. Darüber hinaus bieten Simulationsprogramme die Möglichkeit, Verkehrsbedingungen zu schaffen, die in der Realität (noch) nicht existieren, wie z. B. neue Infrastrukturelemente oder die Interaktion mit im automatisierten oder autonomen Modus fahrenden Fahrzeugen.

3.2 Herausforderungen und Probleme

3.2.1 Validität von Simulatoren

Der Einsatz von Simulatorstudien für die Verkehrssicherheitsforschung setzt voraus, dass die gewonnenen Ergebnisse auf den realen Straßenverkehr übertragen werden können. Die Validität lässt sich dabei unterteilen in die physikalisch-technische Validität, d. h. die Umsetzung des Fahrzeugverhaltens des Simulators, und in die Verhaltensvalidität, die sich auf das Fahrverhalten des Probandens sowie psychologische Aspekte (z. B. Belastung, Beanspruchung, Wahrnehmung) bezieht (HAMMER et al., 2020; MAAG et al., 2021; O'HERN et al., 2017). Über sensorische Eingangsgrößen beeinflusst die physikalische Validität die Verhaltensvalidität. Das Präsenzerleben eines Fahrers in der Simulation ist als Schnittstelle zwischen technischem Aufbau und menschlichem Verhalten zu verstehen. In Bezug auf virtuelle Welten bezeichnet das Konstrukt Präsenz das Ausmaß, in dem sich eine Person als Teil der virtuellen im Gegensatz zur realen Welt fühlt (SHERIDAN, 1992). Das Eintauchen in die virtuelle Welt wird auch als Immersion bezeichnet.

Validierungsstudien konzentrieren sich i. d. R. auf eine Reihe von einzelnen Leistungsmaßen wie z. B. der Fahrgeschwindigkeit. Je nach Übereinstimmung der Leistungsmaße aus einer Simulatorstudie mit der aus einem realen Setting unterscheidet man zwischen der

absoluten und der relativen Validität (O'HERN et al., 2017). Während bei der relativen Validität die betrachteten Verhaltensparameter von Simulator- und Realfahrt lediglich ähnliche Ergebnismuster (bzgl. Ausmaß und Richtung) aufweisen müssen, impliziert die absolute Validität zusätzlich eine numerische Übereinstimmung der Parameter.

Für Pkw-Fahrsimulatoren liegt inzwischen eine große Anzahl an Validierungsstudien zu verschiedenen Leistungsmaßen vor. Demnach belegt die Mehrheit der vergleichenden Studien, dass für die Fahrparameter der Längs- und Querregelung eine relative Validität gegeben ist (MAAG et al., 2021). Dies trifft auch für Einflussfaktoren wie z. B. Fahrerfahrung, Infrastruktur, Sicherungsverhalten (z. B. Blickverhalten), Fahrperformanz, Fahrfehler sowie das Alter (siehe hierzu 3.3) zu. Von der Realität abweichende Wahrnehmungs- und Erlebnisaspekte führen allerdings möglicherweise dazu, dass keine absolute Validität vorliegt. Bezüglich der Gefahrenwahrnehmung hat sich gezeigt, dass identische Szenarien im Pkw-Fahrsimulator tendenziell kritischer wahrgenommen werden als im Realfahrzeug, was zu einer (vermeintlich übertriebenen) Verringerung der Geschwindigkeit führt. Andererseits kann jedoch das Bewusstsein, dass bei einer Simulatorfahrt, nichts real passieren kann, auch ein riskanteres Fahrverhalten provozieren (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Besonders schwierig ist es, hochdynamische Fahrmanöver realitätsgetreu zu simulieren, da in Abhängigkeit der Ausbaustufe des Simulators die vestibulär-kinästhetische Rückmeldung an den Fahrer nur begrenzt möglich ist (MAAG et al., 2021).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich zwar für viele Aspekte eine relative Validität für Pkw-Fahrsimulatoren darstellen lässt, eine vollständige Abbildung der Realität ist mit einer Simulation jedoch nicht möglich (MAAG et al., 2021). Aus diesem Grunde gilt es, Fahrsimulatoren zu nutzen, die die zentralen Aspekte einer Studie möglichst valide abbilden können. So kann es sein, dass sich je nach Fragestellung verschiedene Simulatoren unterschiedlich gut eignen. Beispielsweise hat sich beim Vergleich eines statischen mit einem dynamischen Pkw-Fahrsimulator gezeigt, dass das Bewegungssystem in Bremssituationen die Wahrnehmung signifikant unterstützt (FREY, 2016).

Im Gegensatz zu Pkw-Fahrsimulatoren liegen für Fahrrad- wie auch für Motorradsimulatoren kaum Validierungsstudien vor, da die Simulatorforschung hier noch relativ am Anfang steht. In einer ersten Studie zu Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren (HAMMER et al., 2020) wurden ein statischer Motorradsimulator, ein dynamischer Motorradsimulator (montiert auf einem hydraulischen Hexapoden zur Bewegungsdarstellung) sowie ein Realfahrzeug miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass eine Fahrt auf dem statischen Simulator zu einer geringeren Beanspruchung führt und damit den Probanden ein stabileres Fahrverhalten und höhere Geschwindigkeiten ermöglicht, während der dynamische Motorradsimulator den Probanden eine höhere Beanspruchung abverlangt. Dafür erzeugt der dynamische im Vergleich zum statischen Motorradsimulator insbesondere bei Kurvenfahrten ein realitätsgetreueres Fahrgefühl.

Zur Untersuchung der Verhaltensvalidität eines statischen Fahrradsimulators mit VR-Brille liegt eine Studie mit jungen Fahrradfahrern im Alter von 18 bis 35 Jahren vor (O'HERN et al., 2017). Beim Vergleich der Simulatorfahrt mit einer Realfahrt ergab sich eine absolute Validität für verschiedene Maße der räumlichen Ausrichtung wie mittlere Spurposition, Abweichung der Spurposition und mittlerer Abstand zum ruhenden Verkehr am Straßenrand. Eine relative Validität zeigte sich für die gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsreduktion bei Anfahrt an einen Knotenpunkt. Bis zu einem gewissen Grad erwiesen sich auch die beobachteten Kopfbewegungen an Knotenpunkten als valide.

Der in der Studie von O´HERN et al. (2017) verwendete Fahrradsimulator war – wie auch der in dieser Studie genutzte Fahrradsimulator (siehe Kapitel 5.1) – statisch angebracht, so dass Kurvenfahrten nur durch Lenkbewegungen in die Richtung der Kurve und nicht durch Schwerpunktverlagerungen initiiert werden konnten. Bei einer realen Kurvenfahrt spielen jedoch Gewichtsverlagerungen neben Lenkbewegungen eine große Rolle. Hinzu kommt, dass eine reale Kurvenfahrt durch einen kurzen Lenkereinschlag in die Gegenrichtung eingeleitet wird, was wiederum eine leichte Seitenneigung in Kurvenrichtung auslöst, die durch anschließenden Lenkereinschlag in die Kurvenrichtung abgefangen wird (ERB, 2001; SCHLICHTING, 1984). Dieses Fahrmanöver, das eine schnelle und oft unbewusst motorische Reaktion des Fahrers erfordert, kann mit einem statischen Fahrradsimulator nicht durchgeführt werden. Ebenfalls muss der Fahrer bei einer simulierten Geradeausfahrt bei geringer Geschwindigkeit keine auftretenden Seitenneigungen durch Lenkereinschläge oder Gewichtsverlagerungen kompensieren. Zudem können unebene oder rutschige Untergründe nicht simuliert werden. Schließlich ist das Auf- und Absteigen bei einem fest angebrachten Fahrradsimulator deutlich einfacher. Diese Einschränkungen in Bezug auf die Validität müssen bei einem statischen Fahrradsimulator berücksichtigt werden. Je nach zu untersuchender Fahraufgabe könnte der statische Fahrradsimulator jedoch auch – ähnlich wie bei der oben genannten Motorradstudie – Vorteile mit sich bringen. Eine Validierungsstudie mit einem statischen und einem dynamischen Fahrradsimulator im Vergleich zu einem Realfahrrad als Validierungskriterium ist bisher jedoch nicht bekannt.

3.2.2 Simulatorkrankheit

Ein großer Nachteil von Simulatorfahrten ist, dass sie nicht von allen Fahrern jederzeit gut vertragen werden. Die sogenannte Simulatorkrankheit stellt einen Spezialfall der Bewegungskrankheit (Kinetose) dar (NEUKUM & GRATTENTHALER, 2006). Typische Symptome sind unter anderem Unwohlsein, Schwindel/Benommenheit, Kopfschmerzen, verschwommenes Sehen, Augenschmerzen, Schwitzen und Übelkeit – bis hin in extremen Fällen zu Erbrechen (BALK et al., 2013; KENNEDY et al., 1993; REINHARD et al., 2017). Die Symptomatik kann wenige Minuten bis hin zu mehreren Stunden andauern. In einer Fahrradsimulatorstudie (SHOMAN & IMINE, 2020) zeigte sich, dass v. a. folgende Symptome ausgeprägt waren: Schwierigkeiten zu fokussieren, allgemeines Unwohlsein, Benommenheit bei geschlossenen Augen und Schwitzen.

Die Ursache der Simulatorkrankheit ist die Diskrepanz zwischen dem optischen Bewegungseindruck und der davon abweichenden Wahrnehmung des Gleichgewichtsorgans (Vestibulum) (BALK et al., 2013; SCHLENDER, 2008; SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Umso länger man diesen diskrepanten Sinneseindrücken ausgesetzt ist, umso mehr können sich die Symptome verschlechtern. Frauen und ältere Fahrer sind häufiger davon betroffen (BEHRANG et al., 2018; RANGELOVA et al., 2020). Unter älteren Fahrern werden je nach Simulator und simulierten Verkehrsszenarien Abbruchquoten von etwa 40 % berichtet (TRICK & CAIRD, 2011).

Das Auftreten der Simulatorkrankheit kann einen beträchtlichen Einfluss auf die Verhaltensvalidität haben. So fahren Betroffene oft langsamer, bremsen vorsichtiger und beschleunigen schwächer (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Es ist zu vermuten, dass Kopf- und Blickbewegungen reduziert oder gar vermieden werden. Zudem erhöht die Simulatorkrankheit die Drop-Out-Rate in Untersuchungsstudien. Insbesondere Übelkeit bzw. Symptome, die im Zusammenhang mit Übelkeit stehen, wie allgemeines Unwohlsein, unangenehmes Magengefühl, Schwitzen, vermehrter Speichelfluss und Schwindel, aber auch Symptome wie Konzentrationsprobleme, Aufstoßen, Benommenheit bei offenen und

geschlossenen Augen, Überreizung und Fokussierungsprobleme begünstigen einen vorzeitigen Studienabbruch (BALK et al., 2013).

Es gibt verschiedene Einflussfaktoren, die zum Auftreten der Simulatorkrankheit beitragen und von denen Maßnahmen zur Verringerung der Simulatorkrankheit abgeleitet werden können (CASSAVAUGH et al., 2011). So kann die Größe des Sichtfeldes bzw. die Art Präsentation der optischen Reize einen Einfluss auf die Auftretenshäufigkeit der Simulatorkrankheit haben. Auch die Helligkeit und Kontraststärke des Bildes sowie Zeitverzögerungen zwischen dem mechanischen Input und dem optischen Output haben einen Einfluss auf die Verträglichkeit, so dass eine gute Abstimmung dieser Prozesse gewährleistet sein sollte (NEUKUM & GRATTENTHALER, 2006). Neben dem Simulator spielt auch die Wahl der dargebotenen Verkehrsszenarien eine wichtige Rolle (STONER et al., 2011). Dynamische Fahrmanöver, abrupte Geschwindigkeitswechsel, häufiges Bremsen und Abbiegemanöver begünstigen die Symptomatik, weshalb diese erst nach einer guten Eingewöhnung und nur dosiert eingesetzt werden sollten. Neben Alter und Geschlecht können zudem der Gesundheitszustand sowie die aktuelle Tagesverfassung einen Einfluss ausüben. Eine wichtige Maßnahme zur Reduktion von Symptomen ist eine ausreichende Simulatorgewöhnung zur Toleranzentwicklung gegenüber den Symptomauslösern (NEUKUM & GRATTENTHALER, 2006). Zur Eingewöhnung werden mehrere kürzere Einzelfahrten mit jeweils neuen Lernzielen empfohlen (HOFFMANN & BULD, 2006). Auch kann es hilfreich sein, die Simulatorfahrten auf mehrere Tage mit Pausen dazwischen zu verteilen, was den Testaufwand allerdings deutlich erhöht.

3.3 Senioren als Zielgruppe

Wie schon eingangs erwähnt (Kapitel 3.2.1), beziehen sich die meisten publizierten Simulatorstudien auf Pkw-Fahrsimulatoren. Das trifft auch auf die spezifische Zielgruppe der Senioren zu. Erkenntnisse zu Fahrradsimulatorstudien mit Senioren sind bis dato dagegen nicht bekannt. Aus diesem Grund werden im Folgenden einige Simulatorstudien aus dem Pkw-Sektor zitiert.

In Kapitel 3.2.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich der Einfluss des Alters auf das Fahrverhalten im Pkw-Fahrsimulator – verglichen mit Realfahrten – nachweisen lässt. Mehrere Studien konnten nachweisen, dass die Simulation Alterseffekte auf die Fahrperformanz valide (relative Validität) abbilden kann, was für den diagnostischen Wert von Simulatorfahrten zur Identifikation älterer Fahrer mit beeinträchtigten Fahrkompetenzen spricht (MAAG et al., 2021). So zeigte sich in einer Studie mit einem Fahrsimulator mit Bewegungssystem, dass das Fahrverhalten älterer Fahrer geprägt ist durch langsames Fahren, stärkere Verzögerungen, dichteres Auffahren und eine schlechtere Spurhaltung (BULD et al., 2006). Dabei ist zu beachten, dass sich bei der Gruppe der älteren Fahrer große interindividuelle Unterschiede feststellen ließen. Eine große Varianz von Leistungsunterschieden innerhalb der Seniorengruppe ergab sich auch in der Studie von Schumacher und Schubert (2018), weshalb das Lebensalter als alleiniger Prädiktor der Fahrperformanz ungeeignet ist. Dennoch fanden sich auch hier im Durchschnitt deutliche Leistungseinbußen im Vergleich zu einer jüngeren Kontrollgruppe. Beispielsweise fuhren die älteren Fahrer häufiger mit einem zu geringen seitlichen Abstand zu anderen Fahrzeugen, machten mehr Fahrfehler und gerieten häufiger in kritische Verkehrssituationen. Gleichermäßen konnte in einer Querschnittstudie mit einem Fahrsimulator (DOROUDGAR et al., 2017) gezeigt werden, dass ältere Fahrer im Vergleich zu jüngeren mehr Kollisionen erlebten, langsamer fuhren, weniger Geschwindigkeitsvariationen (geringere Standardabweichung) zeigten und weniger konstant den Abstand zu einem

vorausfahrenden Fahrzeug halten konnten. In einer prospektiven Studie (LEE & LEE, 2005) konnten nicht nur Leistungseinschränkungen älterer Fahrer in einer Simulatorfahrt nachgewiesen werden, sondern darüber hinaus ließ sich auch ein Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten während der Simulatorfahrt und der Anzahl von Verkehrsvorfällen in einem Zeitraum von bis zu 3 Jahren nach der Simulatorfahrt darstellen. MAAG et al. (2021) kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass die prädiktive Validität für altersbedingte Fahrleistungseinbußen mit der in ihrem Projekt entwickelten Verhaltensbeobachtung sowohl mit Hilfe eines High-Fidelity-Simulators als auch mit einem Kompaktsimulator höher ist als für alle derzeit in der diagnostischen Praxis verwendeten psychometrischen Tests.

Interessant zu erwähnen ist, dass sich eine deutliche Divergenz zwischen der Fremd- und der Selbsteinschätzung der Fahrkompetenz bei Senioren herausstellte (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Während die älteren Fahrer fast ausnahmslos (92 %) ihre Fahrleistung als ‚normal‘ einschätzten, stimmten nur 27 % der Beobachter dieser Bewertung zu.

3.4 Fahrradsimulatorprojekte in Deutschland

Die Fahrradsimulatorforschung ist im Vergleich zur Pkw-Simulatorforschung noch im Erprobungsstadium. Entsprechend liegen bisher nur wenige, publizierte Forschungsergebnisse vor. Erste deutschsprachige Projekte und Forschungsstudien sind in Tabelle 2 gelistet. Die aktuellen Projekte befassen sich schwerpunktmäßig mit folgenden Themenbereichen: Interaktion von Fahrradfahrern mit Fußgängern und Autofahrern bzw. mit im automatisierten und/oder autonomen Modus fahrenden Fahrzeugen, Verkehrssicherheitstrainings, Evaluation von Infrastrukturmaßnahmen (auch in Bezug auf die subjektive Sicherheitswahrnehmung) sowie Fahrradassistenzsysteme in Form von intelligenten Gefahrenmeldungen bzw. Vernetzung mit anderen Fahrzeugen. Spezifische Projekte zur Anwendung von Fahrradsimulatoren für die Verhaltensbeobachtung von Senioren sind bisher nicht bekannt, was den besonderen Charakter der vorliegenden Machbarkeitsstudie unterstreicht. Des Weiteren liegen aus dem deutschsprachigen Raum noch keine Validierungsstudien zu Fahrradsimulatoren vor.

Institution	Fahrradsimulatorstudien: Forschungsthemen und-projekte
DLR Braunschweig	Interaktion zwischen Fußgängern, Fahrradfahrern und Autofahrern, Kommunikation zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern, Fahrerassistenzsysteme (DLR, 2021)
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg	FIVIS: Immersiver Fahrradsimulator zur Verkehrserziehung und zum Verkehrssicherheitstraining für verschiedene Altersklassen (H-BRS, o. D.)
Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS)	NRVP-Projekt: Cyclist And PEdestrians on REal and Virtual Shared rOads (Cape Reviso) (WÖSSNER et al., 2022)
TH Ingolstadt	Konzepte zum sicheren Passieren von Kreuzungen; vernetztes Fahren und Radfahrer; intelligente Gefahrenmeldungssysteme; Intelligente/r Fahrradbrille/helm (SAVINO et al., 2021; SAWITZKY, GRAUSCHOPF & RIENER, 2020; SAWITZKY, WINTERSBERGER et al., 2020)
TH Nürnberg	Attraktive Infrastruktur zur Akzeptanz von Fuß- und Radwegverbindungen, Anwendung von VR (TH NÜRNBERG, 2021)
TU Berlin	NRVP-Projekt: SuSi 3D – Subjektive Sicherheit von Radverkehrsinfrastruktur (FRIEL et al., 2020)
TU Berlin – Telecommunication Networks Group	BMBF Projekt Safety4Bikes, intelligente Gefahrenmeldungen, Vernetzung von Fahrrädern und anderen Fahrzeugen (BMBF, o. D.; HEINOVSKI et al.; KRÜGER et al., 2021; OCZKO et al., 2020)
TU Braunschweig	Fahrradgerechte Navigation, Evaluation von Infrastrukturmaßnahmen (A. HUEMER et al., 2018; A. K. HUEMER et al., 2021)
TU München	RASCH – Bicycle Highways: Designing efficient and secure Infrastructure (KATHS, H., KELER, A. et al., 2021) RadOnTime – Effects of Countdown Timers on Bicycle Traffic (KATHS et al., 2021) @CITY – Automated Vehicles and Intelligent Traffic in the City/@CITY-AF – Automated Driving Functions (@CITY, 2018; KELER et al., 2021)
Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH (WIVW)	Interactions Between Cyclists and Automated Vehicles (KASS, SCHOCH, NAUJOKS, HERGETH, KEINATH & NEUKUM, 2020; KASS, SCHOCH, NAUJOKS, HERGETH, STEMMLER et al., 2020; PURUCKER et al., 2019)

Tab. 2: Fahrradsimulatoren in Deutschland – Aktuelle Forschungsthemen und -projekte

4 Ziele der Studie

Untersuchungen im Simulator bieten einige Vorteile gegenüber Untersuchungen im Realverkehr (Kapitel 3.1), weshalb sie als Methode zur Verhaltensbeobachtung für die Verkehrssicherheitsforschung einen immer größeren Stellenwert einnehmen. Zugleich gilt es, die Möglichkeiten und Grenzen von Simulatoren hinsichtlich ihrer Validität und hierbei auch das mögliche Auftreten von Symptomen der Simulatorkrankheit abzuklären (vgl. Kapitel 3.2). Aus Untersuchungen mit Pkw-Fahrsimulatoren ist bekannt, dass sich Untersuchungsergebnisse mit Probanden aus einer mittleren Altersgruppe nicht ohne Weiteres auf die spezifische Zielgruppe der Senioren übertragen lassen, da sich sowohl Unterschiede im Fahrverhalten als auch in der Verträglichkeit zeigen. Zugleich stellen Senioren aufgrund ihrer steigenden Mobilität bei zugleich erhöhter Vulnerabilität bei Fahrradunfällen eine besonders wichtige Zielgruppe für die Verkehrssicherheitsforschung dar (Kapitel 2.1).

Da experimentelle Forschungsstudien mit Fahrradsimulatoren grundsätzlich noch Pioniercharakter haben und zudem noch keine systematischen Erfahrungen mit der spezifischen Zielgruppe der Senioren vorliegen, ist die vorliegende Arbeit in zweierlei Hinsicht als Machbarkeitsstudie zu verstehen. Im Sinne einer Vorstudie für spätere Untersuchungen mit dem Fahrradsimulator sollte grundsätzliches Wissen über die Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen zum Einsatz von Fahrradsimulatoren für die Verhaltensbeobachtung geschaffen werden. Das gilt sowohl für das Eingewöhnungstraining mit dem Fahrradsimulator als auch für die Untersuchungsmöglichkeiten von verschiedenen Verkehrssituationen im virtuellen Umfeld. Von besonderem Interesse ist hierbei, ob sich Unterschiede zwischen Probanden im Seniorenalter versus einer mittleren Altersgruppe feststellen lassen.

Das Ziel der Studie ist, auf folgende zentrale Fragestellungen Antworten zu finden, wobei grundsätzlich zwischen Senioren ab 65 Jahren (Experimentalgruppe) und Probanden einer mittleren Altersgruppe von 25–50 Jahren (Kontrollgruppe) differenziert wird:

- Zur Eingewöhnung:
Bewährt sich das entwickelte Eingewöhnungstraining (Kapitel 5.3) mit drei verschiedenen Übungsstrecken, die an einem Untersuchungstag stattfinden? Welche Strecken eignen sich besonders gut für die Eingewöhnung, und welche Fahrübungen sind erforderlich, damit die Probanden auf die Teststrecke gut vorbereitet sind?
- Zum Fahrverhalten:
Wie gut kommen die Probanden mit dem Fahrradsimulator – gemessen anhand von Fahrperformanz, Kompensationsverhalten, Fahrfehler und -unsicherheiten – zurecht?
- Zur Abbrecherquote (Drop-out-Rate):
Wie hoch ist die Abbrecherquote? Wann und aus welchen Gründen (z. B. Simulatorkrankheit, Fahrprobleme) brechen die Probanden die Studie vorzeitig ab?
- Zur Validitätseinschätzung (Augenscheinvalidität) und Immersion:
Wie realistisch schätzen die Probanden das Fahren auf dem Fahrradsimulator sowie die Darstellungen der virtuellen Umgebung ein? Werden unfallkritische Verkehrsszenen in der Simulation auch als kritisch erlebt?

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Fahrradsimulator und Fahrsimulatorsoftware

Der Fahrradsimulator sowie die Fahrsimulatorsoftware SILAB sind vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) entwickelt worden. Als Mockup dient ein ‚reales‘ mit Sensorik ausgestattetes Trekkingrad von Cube (Bild 1 und Bild 2). Die virtuelle Umgebung wird über zehn Großformat-Displays dargestellt, die einen 300° Horizontal- und einen 100° Vertikal-Sichtbereich ermöglichen. Über Kopfhörer kann der Proband die Fahrgeräusche der anderen Verkehrsteilnehmer, Hintergrundgeräusche sowie auch Navigationsansagen und Hinweise von den Versuchsleitern (per Mikrofon) hören.

Das Fahrrad-Mockup ist auf einer passiv leicht beweglichen Trägerplatte angebracht, wobei das Vorderrad auf dem Lenklager liegt (Bild 3) und das Hinterrad an der Widerstandseinheit des Aktuators (Tacx Genius Smart Rollentrainer) befestigt ist (Bild 4). Die geringen, seitwärtigen Kippbewegungen, die die Trägerplatte zulässt, wirken sich jedoch nicht auf die Simulation aus, so dass der Fahrradsimulator einem statischen Fahrradsimulator (und nicht einem dynamischen Fahrradsimulator, siehe Kapitel 3.2.1) entspricht. Mittels des Aktuators und einer Kurbel wird die Trittleistung gemessen. Die Sensorik besteht dabei aus folgenden Elementen: Lenkwinkelsensor, Bremssensoren (Vorder- und Hinterrad), Leistungsmesskurbel („Power Meter“) sowie Kettenblatt- und Hinterradumdrehungssensor. Zur Simulation von Windlast, Roll- und Steigungswiderstand wird der Aktuator über SILAB angesteuert. Die elektronische 11-Gang-Schaltung (Shimano Alfine DI2) ist ebenfalls an SILAB angebunden. Zudem ist eine Pedelec-Simulations-Option vorhanden, die über einen Lenkertaster bedienbar ist (Bild 5). Das Fahrrad-Mockup verfügt über komplett funktionsfähige Vorder- und Hinterradbremmen (inkl. simulierter Radlastverlagerung). Mittig am Lenker ist ein Multifunktionsdisplay angebracht (Bild 6), das mit einem Radcomputer verbunden ist. Dem Probanden werden über dieses Display die Navigation, die Geschwindigkeit und der gewählte Gang angezeigt. Diese Anzeige wird für die Versuchsleiter – zusätzlich zur virtuellen Fahrstrecke – auf einem gesonderten Bildschirm übertragen. Die Versuchsleiter sitzen im selben Raum im Rücken des fahrenden Probanden.³

Das Rechnernetzwerk besteht aus dem Operator-Rechner zur Steuerung der Simulation, dem Main-Rechner für rechenintensive Operationen wie z. B. der Steuerung des Verkehrs, dem Mockup-Rechner zur Steuerung und Kommunikation mit der am Mockup verbauten Hardware, dem Video-Rechner zur Aufzeichnung von Video- und Fahrdaten sowie vier weiteren Rechnern zur Anzeige der Simulation auf den zehn Monitoren.

Die zu bewältigenden virtuellen Fahrstrecken wurden vorab mit der Fahrsimulatorsoftware SILAB erstellt. Mit SILAB lassen sich Fahrstrecken durch die freie Zusammenstellung von einzelnen Streckenelementen sowie durch Anpassung und Hinzufügung von einzelnen Umgebungselementen sowie anderer Verkehrsteilnehmer zu einem komplexen Verkehrsszenario konstruieren. Ebenfalls ist es möglich, die Fahrstrecke sowie die Verkehrsszenarien komplett neu zu gestalten.

Im vorliegenden Projekt wurden die Übungsstrecken und die Teststrecke bis auf die zweite Übungsstrecke „Fahrradparcours“, die vom WIVW zur Verfügung gestellt wurde, aus vorgegebenen Streckenelementen zusammengestellt und teilweise angepasst. Dabei wurden in die Teststrecke mehrere unfallkritische Verkehrsszenen – erzeugt durch unerwartetes Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern – eingearbeitet. Die drei Übungsstrecken und die Teststrecke werden im Kapitel 5.4 genauer erläutert.

³ Es besteht die Möglichkeit, die Probanden per Videokameraübertragung auch von vorne zu beobachten; von dieser Möglichkeit wurde in diesem Experiment nicht Gebrauch gemacht.



Bild 1: Fahrrad-Mockup

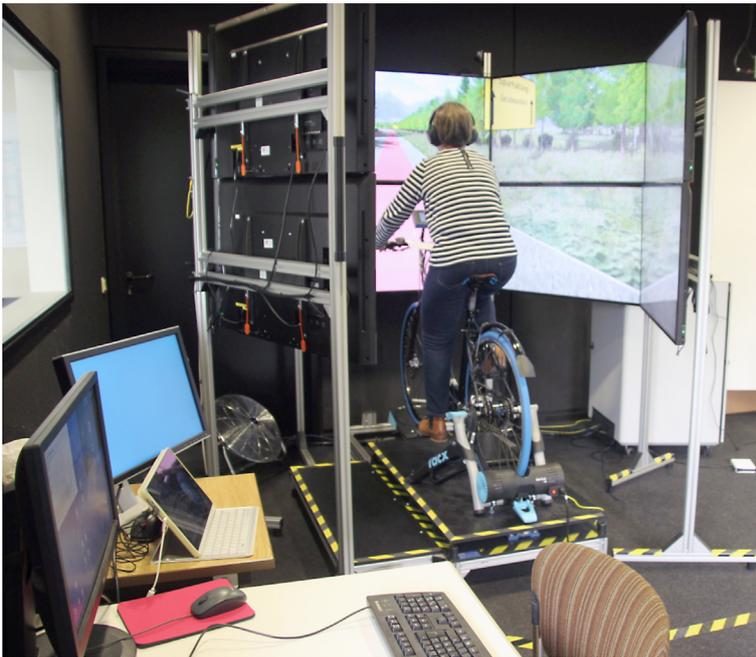


Bild 2: Fahrrad-Simulator-Labor



Bild 3: Vorderrad auf dem Lenklager



Bild 4: Hinterrad an der Widerstandseinheit des Aktuators



Bild 5: Lenkertaster zur Pedelec-Simulation (links) und für die elektronische 11-Gang-Schaltung (rechts)



Bild 6: Multifunktionsdisplay, mittig am Lenker angebracht

5.2 Probandenrekrutierung

Ziel der Probandenrekrutierung war es, sowohl für die Experimentalgruppe (Senioren ≥ 65 Jahre) als auch die Kontrollgruppe (Probanden im Alter von 25–50 Jahren) mindestens 30 Teilnehmer mit einem möglichst ausgewogenen Geschlechtsverhältnis zu rekrutieren. Das Altersspektrum der Kontrollgruppe war so breit gewählt worden, da bis dato noch kaum Erfahrungen mit dem Fahrradsimulator vorlagen und diese für möglichst viele Altersgruppen gesammelt werden sollten. Zugleich wurde jedoch bei der Festlegung des Altersspektrums gezielt darauf geachtet, dass zum einen ein deutlicher Altersabstand zur Gruppe der Senioren bestehen sollte, als auch zum anderen die besondere Zielgruppe der jungen Fahrer (18–24 Jahre), die oftmals (zumindest in Bezug auf Pkw-Fahrten) mit besonderer Risikofreudigkeit in Verbindung gebracht wird (HOLTE, 2012), bei dieser Senioren-Studie nicht miteinbezogen wird.

Voraussetzungen für die Teilnahme waren, dass die Probanden mindestens einmal im Monat Fahrrad fahren und gesundheitlich in der Lage sind, 10 Minuten ohne Pause Fahrrad fahren zu können. Darüber hinaus mussten die Teilnehmer aufgrund der Bauart des Fahrrads zwischen 1,60–1,95 m groß sein und durften inklusive Kleidung nicht mehr als 110 kg wiegen.

Für die Probandenrekrutierung wurde zunächst auf den Probandenpool zurückgegriffen, der für die Vorgängerprojekte mit dem Pkw-Fahrsimulator angelegt wurde und regelmäßig erweitert wird. In den Probandenpool werden Teilnehmer aufgenommen, die sich bereit erklären, an (weiteren) Fahrversuchen teilzunehmen. Die Datenbank des freiwilligen Probandenpools enthält Basisdaten wie u. a. Adresse, Alter, Geschlecht, Führerschein, Fahrperformanz etc. Da über den bis dato bestehenden Probanden-Pool nicht genug Teilnehmer für die Experimentalgruppe ab 65 Jahre gewonnen werden konnten, wurden darüber hinaus neue Probanden über Posteraushänge an öffentlichen Plätzen sowie per Flyer rekrutiert. Des Weiteren wurden Probanden aus dem Bekanntenkreis von BAST-Mitarbeitern geworben.

5.3 Ablauf der Untersuchung

Auf Basis von Erfahrungen des WIVW sowie aus Selbstversuchen der Versuchsleiter wurde ein Eingewöhnungstraining ausgearbeitet mit drei verschiedenen Übungsfahrten und einer abschließenden Testfahrt. Für die Durchführung wurden die Probanden in die BAST nach Bergisch Gladbach eingeladen (Zeitraum: Sept.–Nov. 2019) mit dem Hinweis, dass sie für die Studie ca. 1,5 bis maximal 2 Stunden einplanen sollten. Der Versuchsablauf war folgendermaßen (Bild 7):

Zunächst fand ein aufklärendes Einführungsgespräch statt (ca. 10–15 min) und die Probanden wurden aufgefordert, die unten aufgelisteten Einverständniserklärungen zu unterschreiben. Dann wurde den Probanden der Vorher-Fragebogen ausgeteilt. Dessen Bearbeitungszeit schwankte zwischen den Probanden mit 14–66 min erheblich (Kapitel 6.1.2). Vor der eigentlichen Testfahrt, die ca. 7–15 min dauerte, wurden zur Gewöhnung an den Fahrradsimulator drei Übungsfahrten von jeweils 2–3 min durchgeführt. Nach jeder der vier Simulatorfahrten konnten sich die Probanden entsprechend ihres individuellen Erholungsbedarfs ausruhen sowie Getränke und Snacks zu sich nehmen. Zudem sollten sie im Rahmen der Pausen jeweils einen kurzen Fragebogen (hier genannt Kurz-Fragebogen) ausfüllen (ca. 2 min). Nach der letzten Simulatorfahrt, der Testfahrt, wurde zusätzlich zum Kurz-Fragebogen der Abschluss-Fragebogen ausgeteilt (ca. 10 min Bearbeitungszeit).

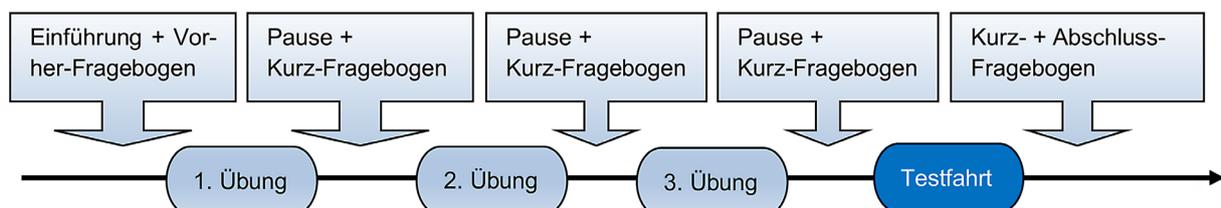


Bild 7: Versuchsablauf

Bei der Terminplanung hatte sich bewährt, zeitgleich zwei Probanden einzuladen, die gemeinsam mit der Einführung und dem Vorher-Fragebogen starteten und dann im Wechsel den Fahrradsimulator fuhren bzw. einen Fragebogen beantworteten. Das Einführungsgespräch und das Beantworten der Fragebögen fand im Vorraum des Simulatorlabors statt, der durch eine Tür vom Simulatorlabor getrennt ist, so dass sich die Probanden bei den

Simulatorfahrten nicht gegenseitig beobachten konnten. Je nachdem, ob nur ein oder parallel zwei Probanden am Versuch teilnahmen als auch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beim Beantworten der Fragebögen sowie bei den Simulatorfahrten und der individuellen Erholungszeit nach den Simulatorfahrten variierte die Gesamtzeit des Versuchsablaufs zwischen 1 und 2 Stunden.

5.3.1 Einführungsgespräch

Im Einführungsgespräch wurden die Probanden zunächst darauf hingewiesen, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig sei und sie jederzeit den Versuch – auch ohne Angabe von Gründen – abbrechen könnten. Ebenfalls könne der Versuchsleiter unter gewissen Umständen entscheiden, dass die Teilnahme aufgrund von gesundheitlichen Risiken vorzeitig abgebrochen werden müsse. Die Probanden wurden über die Ziele sowie den Versuchsablauf der Studie aufgeklärt. Dabei wurde ausdrücklich auf die Risiken der Teilnahme hingewiesen wie insbesondere das Auftreten von möglichen Symptomen der Simulatorkrankheit. Weiterhin wurde den Probanden erklärt, dass sie über die BAST im Falle eines Wegeunfalls (An- und Abfahrt zur BAST) versichert seien. Im Laufe der Studie wurde zudem – aufgrund des z. T. sehr hohen Alters der teilnehmenden Probanden – zusätzlich eine Unfallversicherung für die eigentlichen Versuchsfahrten abgeschlossen, wobei das Verletzungsrisiko grundsätzlich aufgrund des stabilen Aufbaus des Mockups als gering einzustufen ist. Schließlich wurden die Probanden darüber aufgeklärt, dass ihre Daten anonym ausgewertet und aufbewahrt würden, und dass keine Weitergabe der Daten an die Führerscheinbehörde erfolgen würde. Folgende Formulare wurden den Probanden zum Ausfüllen bzw. zum Mitnehmen ausgehändigt:

- Teilnehmerinformation (Inhalte des Einführungsgesprächs zum Mitnehmen)
- Einverständniserklärung zur Datenaufzeichnung, -speicherung, -verwertung und -aufbewahrung
- Haftungsausschluss (nur für die ersten Probanden vor Abschluss der Unfallversicherung)
- Einwilligungserklärung zur Teilnahme
- Bestätigung des Erhalts der Aufwandsentschädigung (Aufklärung vorher, Erhalt und Unterschrift nach der Untersuchung)

Anschließend wurde den Probanden der Vorher-Fragebogen ausgeteilt (s. Kapitel 5.5.2 und Anhang I).

5.3.2 Erläuterung des Mockups

Vor der ersten Übungsfahrt wurde den Probanden im Simulatorlabor die Bedienung des Mockups erklärt. Dabei wurde explizit darauf hingewiesen, dass sich insbesondere die Lenkung von der Fahrdynamik einer Realfahrt dahingehend unterscheidet, dass man nicht durch Gewichtsverlagerung lenken könne und zu Beginn möglichst vorsichtige Lenkbewegungen vornehmen solle. Die elektronische Gangschaltung war für viele Probanden zu Anfang ungewohnt, weshalb deren Bedienung vorgeführt und von den Probanden schon vor der Fahrt ausprobiert wurde. Hierbei wurden die Probanden darauf hingewiesen, dass sie die Gänge nach eigenem Bedarf selber wählen können, mittelhohe bis hohe Gänge jedoch aufgrund eines ruhigeren Fahrbildes empfehlenswert wären. Des Weiteren wurde ihnen der Pedelec-Schalter erläutert, den die Probanden aber möglichst selber nicht verstellen sollten, damit die Versuchsbedingungen für alle Probanden vergleichbar sind (s. notwen-

dige Anpassungen im Verlauf der Studie). Schließlich wurde die Sattelhöhe auf die Größe der Probanden angepasst und Ihnen der Kopfhörer ausgehändigt. Dieser überträgt sowohl die Fahrgeräusche von anderen Verkehrsteilnehmern als auch Hintergrundgeräusche sowie automatisch ausgelöste Navigationsansagen. Da der Kopfhörer zugleich Außengeräusche unterdrückt (noise cancelling), wurden Anweisungen seitens des Versuchsleiters per Mikrofon mitgeteilt.

5.3.3 Nachträgliche notwendige Anpassungen der Versuchsanordnung

Experimentelle Versuchsanordnungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Probanden möglichst standardisierten Versuchsbedingungen ausgesetzt sind, um gezielt den Einfluss bestimmter Faktoren untersuchen zu können. Bei der vorliegenden Studie lag der Fokus – trotz experimentellen Designs mit Merkmalsdifferenzierung zwischen den beiden Probandengruppen (25–50-jährige versus Senioren ab 65 Jahre) zunächst auf der erstmaligen Erprobung des Fahrradsimulators in der BAST (sog. ‘Machbarkeitsstudie’). Aus diesem Grunde wurden im Sinne der Machbarkeitsprüfung notwendige und sinnvolle Anpassungen der Versuchsanordnung im begrenzten Ausmaß zugelassen, die im Folgenden aufgelistet werden:

- (1) Technische Notwendigkeiten führten zu einer leichten Anpassung der Versuchsanordnung:
 - a. Nachdem ca. ein Drittel der Probanden den Fahrradsimulator gefahren war, musste aufgrund eines technischen Defekts ein Verbindungsstück der Lenkführung ausgetauscht werden. Dieses neue Verbindungsstück führte dazu, dass die Lenkführung spürbar stabiler wurde.
 - b. Zudem kam es aufgrund einer Überlastung des Operator-Rechners bei einzelnen Probanden zeitweise zu einem leicht stockenden Bildfluss der Simulation. Auch dieses Problem konnte erst behoben werden, nachdem ca. ein Drittel der Probanden gefahren war.
- (2) Grundsätzlich war angedacht, dass die Probanden alle vier Simulatorfahrten mit höchster Pedelec-Unterstützung fahren sollten, damit mögliche konditionelle Probleme nicht zu einem vorzeitigen Abbruch führen würden. Allerdings führten Handhabungsprobleme seitens der Probanden dazu, dass nicht alle Probanden mit derselben Pedelec-Unterstützung fuhren:
 - a. So stellte sich nach den ersten Probanden heraus, dass aufgrund der Pedelecunterstützung leicht zu erreichenden hohen Geschwindigkeiten sich die Probleme mit dem Handling der Lenkung verstärkten. Aus diesem Grunde wurde nach etwa der Hälfte der Probanden entschieden, nur bei der letzten, längeren Simulatorfahrt, der Testfahrt, die Pedelec-Unterstützung auf höchster Stufe einzuschalten.
 - b. Allerdings konnte auch diese Versuchsanordnung nicht konsequent eingehalten werden, da viele Probanden während der Fahrt den Pedelec-Schalter, der sehr nah an den Lenkergriffen angebracht war, versehentlich berührten und auf diese Weise die Voreinstellung veränderten.
- (3) Um mögliche gesundheitliche Risiken zu minimieren und die Abbruchrate – insbesondere bei den Senioren – so gering wie möglich zu halten, wurde die Einweisung in die Bedienung des Fahrradsimulators sowie die Vorbereitung auf das zu fahrende Streckenszenario nach den Erfahrungen mit den ersten Probanden zunehmend intensiviert.

- a. So wurde bei den älteren Probanden des Öfteren eine sehr schiefe Sitzhaltung auf dem Fahrradsattel festgestellt, weshalb die Probanden immer wieder explizit darauf hingewiesen wurden, eine möglichst gerade Sitzhaltung einzunehmen, möglichst viel Gewicht auf dem Fahrradsattel zu verlagern (was sich im Nachhinein allerdings als kontraproduktiv herausstellte) und nicht zu versuchen, mit Gewichtsverlagerungen zu lenken. Mehrere Probanden mussten auch während der Simulatorfahrten immer wieder an eine gerade Sitzhaltung erinnert werden bis hin zur manuellen Korrektur der Sitzhaltung durch einen der beiden Versuchsleiter.
 - b. Bei älteren Probanden konnte mehrmals beobachtet werden, dass sie sich bei der ersten Übungsstrecke, die eigentlich eine möglichst einfache Eingewöhnungsfahrt darstellen sollte, vor den entgegenkommenden großen Fahrzeugen so erschreckt hatten, dass sie von der Fahrbahn abgekommen waren. Zukünftige Probanden wurden deshalb explizit vor diesen großen Fahrzeugen im Gegenverkehr gewarnt, damit sie sich darauf besser einstellen konnten.
- (4) Nutzung neuer Technologien
- a. Bei einigen größeren Probanden wurde bei den späteren Untersuchungen von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Horizontlinie auf Augenhöhe anzupassen.

Zusammenfassend genügt diese erste Machbarkeitsstudie aufgrund der genannten Anpassungen der Versuchsanleitung, -anordnung und -durchführung nicht den Vorgaben eines quasi-experimentellen Versuchsdesigns mit standardisierten Versuchsbedingungen. Sie wurden jedoch zur Verringerung der (hohen) Abbruchrate als notwendig erachtet (s. Kapitel 6.2). Zudem konnten so wertvolle Hinweise für die Durchführung eines Fahrradsimulator-Experiments mit älteren Probanden sowie Probanden einer mittleren Altersgruppe gewonnen werden, die im Kapitel 7 näher ausgeführt und diskutiert werden.

5.4 Streckendesign

Im Folgenden werden die drei Übungsstrecken zur Eingewöhnung sowie die Teststrecke detailliert erläutert.

5.4.1 Erste Übungsstrecke (Landstrecke)

Die erste Übungsstrecke (Bild 8), die die Probanden zur Eingewöhnung führen, bestand aus einer breiten Landstraße mit zwei Fahrstreifen und überwiegend geraden Streckenelementen sowie weitläufigen Kurven. Rechts und links der Fahrbahn waren fast ausschließlich Wälder und Wiesen. Die Probanden hatten den rechten Fahrstreifen für sich alleine, so dass sie bei Bedarf die gesamte Breite befahren konnten. Die anderen (virtuellen) Verkehrsteilnehmer führen in diesem Streckenszenario nur in Gegenrichtung, wobei u. a. sehr große landwirtschaftliche Fahrzeuge (gemäß Voreinstellung) entgegenkamen. Zum Ende der Übungsfahrt gab es zwei einmündende Straßen von rechts: Bei der ersten T-Kreuzung bog ein Motorradfahrer von rechts kommend in Gegenrichtung ein; bei der anderen nahm ein Traktor dem Probanden beim Einbiegen die Vorfahrt; auch diese kritischen Verkehrsszenen waren im Streckenszenario fest voreingestellt. Ob diese Verkehrsszenen vom einzelnen Probanden dann auch tatsächlich als kritisch erlebt wurden, hing allerdings davon ab, wie schnell der Proband gefahren war. Denn nur bei einer mittleren bis hohen Geschwindigkeit kam es zu einer kritischen Begegnung, so dass die Probanden abbremsen mussten, um eine Kollision zu vermeiden. Die Übungsstrecke endete schließlich an einem Verkehrsschild auf freier, gerader Strecke. Insgesamt dauerte diese erste Übungsfahrt i. d. R. 2–3 min.



Bild 8: Erste Übungsstrecke (Landstrecke)

Lernziele der ersten Übungsfahrt:

- Erstes Vertrautmachen mit dem Fahrradsimulator und dessen Fahrdynamik
- Stabiles Geradeausfahren
- Fahren von weitläufigen Kurven
- Bedienung der Gangschaltung und Wahl eines bevorzugten Ganges
- Gewöhnung und erste Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer bei einem gut überschaubaren Verkehrsszenario

5.4.2 Zweite Übungsstrecke (Fahrradparcours)

Das WIVW hatte zur Eingewöhnung an den Fahrradsimulator einen speziellen Fahrradparcours designt (Bild 9), von dem für die zweite Übungsfahrt folgende Abschnitte verwendet wurden: Spurhaltung auf einer breit markierten, geraden Strecke (Streckenabschnitt A, Bild 10, rote Markierung), Spurhaltung auf einer breit markierten, weitläufigen Krümmung (Streckenabschnitt B, rote Markierung), Spurhaltung auf einer schmal markierten, geraden Strecke (Streckenabschnitt C, gelbe Markierung), Spurhaltung auf einer schmal markierten, weitläufigen Krümmung (Streckenabschnitt D, gelbe Markierung) sowie zuletzt Anhalten vor zwei Haltelinien (Streckenabschnitt E, weiße Markierung). Auf keinem dieser Streckenabschnitte waren andere (virtuelle) Verkehrsteilnehmer unterwegs, so dass sich die Probanden auf die Fahrtechnik konzentrieren konnten. Die Fahrzeit betrug ca. 2–3 min.

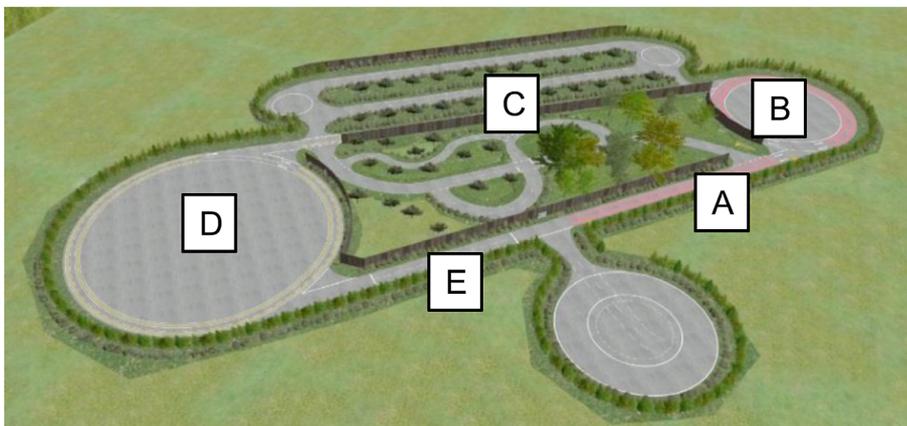


Bild 9: Zweite Übungsstrecke (Fahrradparcours)

Lernziele der zweiten Übungsfahrt:

- Spurhaltung auf gerader Strecke mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad
- Spurhaltung in weitläufiger Links-Kurve mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad
- Bremsen üben und sich dabei mit dem Bremsweg vertraut machen



Bild 10: Zweite Übungsstrecke (Streckenabschnitt A) „Spurhaltung breite, gerade Strecke“

5.4.3 Dritte Übungsstrecke (Kurze Stadtstrecke)

Die dritte Übungsfahrt diente der Gewöhnung an ein Stadtszenario inkl. des Einhaltens der StVO. Auf dieser Strecke wurden erstmalig automatische Navigationsansagen über die Kopfhörer mitgeteilt (anstelle der individuellen Anleitung vom Versuchsleiter per Mikrofon). Die Stadtstrecke begann kurz vor dem Ortseingangsschild auf einer Straße im Mischverkehr (Bild 11). Im Verlauf der kurzen Stadtstrecke musste zweimal rechts abgebogen (einmal mit Vorfahrt gewähren) sowie an einer Ampel und an einem Stopp-Schild angehalten werden. Die Stadtstrecke endete auf einer Parkfläche in einer Sackgasse.

Sobald die Probanden angehalten hatten, wurden sie – zur Vorbereitung auf die Testfahrt – dazu aufgefordert, jeweils auf einer Skala von 1 bis 10 anzugeben, wie realistisch und wie kritisch sie die gerade erlebte Verkehrssituation empfunden hatten. Die Antwortskala dazu war zur Erinnerung mittig an dem Lenker angebracht (Kapitel 5.5.3, Bild 17).



Bild 11: Dritte Übungsfahrt (Kurze Stadtstrecke)

Lernziele der dritten Übungsfahrt:

- Beachten der Verkehrsregeln (Vorfahrtsschilder und Lichtsignalanlagen beachten, Handzeichen geben)
- Berücksichtigen von anderen Verkehrsteilnehmern (inkl. Schulterblick)
- Fahren von Rechtskurven
- Anhalten mit Fuß abstellen
- Berücksichtigen von automatischen Navigationsansagen
- Kennenlernen der Antwortskala zur Einschätzung von Verkehrsszenen (Wie kritisch war die Verkehrssituation? Wie realistisch war die Verkehrssituation?) im Hinblick auf die bevorstehende Testfahrt

5.4.4 Teststrecke

Die Testfahrt fand auf einer Stadtstrecke mit 19 Abschnitten/Verkehrsszenen statt, bei denen die Probanden sowohl auf baulich getrennten Radwegen als auch im Mischverkehr mit und ohne Schutzstreifen bzw. Radfahrstreifen fuhren. Es waren mehrere unfallkritische Verkehrsszenen eingebaut, die – i. d. R. bei mittlerer Fahrgeschwindigkeit – eine Bremsreaktion des Probanden erforderten, um eine Kollision zu vermeiden. Darüber hinaus gab es mehrere unangenehme Verkehrsszenen, die keine Reaktion erforderten, aber dennoch das subjektiv wahrgenommene Risiko beeinflussen konnten. Bei allen Fahrmanövern und Abbiegevorgängen galt es, die StVO einzuhalten.

Im Folgenden werden die 19 Streckenabschnitte mit kurzer Erläuterung der jeweiligen Verkehrsszene aufgelistet:

- (1) Start auf Schutzstreifen
- (2) Wechsel zu baulich getrenntem Radweg
- (3) Wechsel auf die Fahrbahn zum Mischverkehr
- (4) Verkehrsarme (nur Gegenverkehr), gerade Strecke auf der Straße im Mischverkehr („Füllstrecke“)
- (5) Rechtsabbiegen auf Vorfahrtsstraße
- (6) Vorbeifahrt an Bushaltestelle (ohne weitere Verkehrsteilnehmer), plötzliches Queren eines Kindes (Bild 12), ein Pkw überholt, am Fußgängerüberweg quert ein minderjähriger Fußgänger (kritische bzw. unangenehme Verkehrsszene)
- (7) Rechtsabbiegen mit Vorfahrt achten
- (8) Linksabbiegen auf Vorfahrtsstraße
- (9) Linksabbiegen mit Vorfahrt achten
- (10) Wechsel auf baulich getrennten Radweg
- (11) Von rechts biegt eine Radfahlerin ein und fährt mit sehr geringer Fahrgeschwindigkeit vor dem Probanden her bei zugleich überholendem Pkw-Verkehr (Bild 13), ein Pkw überholt mit sehr geringem Abstand (unangenehme und beim Überholvorgang ggf. kritische Verkehrsszene)
- (12) Wechsel zu Schutzstreifen

- (13) Zwei aufeinanderfolgende Kreuzungen, ein Pkw überholt den Probanden mit geringem Abstand und biegt knapp hinter ihm rechts ab (unangenehme Verkehrsszene „schneiden“, Bild 14)
- (14) Kreisverkehr mit Vorfahrt achten
- (15) Halt zwischen zwei Pkw an einer Lichtsignalanlage bei Rot (unangenehme Verkehrsszene, Bild 15)
- (16) Wechsel zu Radweg
- (17) Gelber Lieferwagen kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt (kritische Verkehrsszene) der vorfahrtsberechtigten Hauptstraße (Bild 16)⁴
- (18) Weißer Pkw kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt bei Missachtung der Vorfahrt der führenden Straße (kritische Verkehrsszene)⁵
- (19) Ende auf Radweg



Bild 12: Streckenabschnitt 6 – Kind quert plötzlich die Straße



Bild 13: Streckenabschnitt 11 – Fahrradfahrerin fährt sehr langsam vor Probanden, zugleich überholender Pkw-Verkehr

⁴ Diese Streckenabschnitte sind aufgrund fehlender Verkehrszeichen (205, 306) und Breitmarkierungen an beiden Einmündungen nicht korrekt als Vorfahrtsstraße gekennzeichnet. Jedoch wurden sie von den Probanden aufgrund vorausgehender Vorfahrtszeichen als Vorfahrtsstraße richtig erkannt und nicht fälschlicherweise als Rechts-vor-Links-Regelung verstanden (s. Bild 16)

⁵ wie Fußnote 4)



Bild 14: Streckenabschnitt 13 – Zwei aufeinanderfolgende Kreuzungen, ein Pkw schneidet den Probanden



Bild 15: Streckenabschnitt 15 – Halt zwischen zwei Pkw an einer Lichtsignalanlage bei Rot



Bild 16: Streckenabschnitt 17 – Lieferfahrzeug (von der Post) kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt

5.5 Instrumente und Methoden zur Datenerhebung

Die Datenerhebung basierte auf mehreren Quellen: Zum einen wurden grundlegende soziodemografische Daten aus der Datenbank des Probanden-Pools entnommen (s. Kapitel 5.5.1). Zum anderen haben die Probanden mehrere Teilnehmerfragebögen (Vorher-, Kurz- und Abschluss-Fragebogen) ausgefüllt (s. Kapitel 5.5.2). Des Weiteren wurde das Fahrverhalten von den Versuchsleitern beobachtet und dokumentiert (s. Kapitel 5.5.3).

5.5.1 Basis-Daten aus der Datenbank des Probanden-Pools

Der Datenbank des Probandenpools wurden zum einen die grundlegenden Daten Alter und Geschlecht entnommen. Diese wurden telefonisch bei der Rekrutierung der Probanden erhoben. Zum anderen ist in der Datenbank die bisherige Simulator-Erfahrung in der BASt dokumentiert, das heißt, ob und falls ja, an welchen Projekten mit dem ebenfalls in der BASt existierenden (Pkw-)Fahrsimulator die Probanden bereits teilgenommen hatten.

5.5.2 Teilnehmer-Fragebögen

Wie eingangs erläutert, wurde den Probanden vor den Fahrten (Vorher-Fragebogen, Anhang I), nach den Übungsfahrten und der Testfahrt (Kurz-Fragebogen, Anhang II) sowie zuletzt ein zusammenfassender Abschluss-Fragebogen (Anhang III) zum Beantworten ausgeteilt. Diese drei Erhebungsinstrumente sollen im Folgenden erläutert werden.

Vorher-Fragebogen (vor den Fahrten)

Der Vorher-Fragebogen wurde von den Probanden nach der Einführung und vor der ersten Übungsfahrt ausgefüllt. Mit dem Vorher-Fragebogen wurden die Bereiche Fahrerfahrung, Nutzungsmotive und -zwecke, Fahrverhalten sowie gesundheitliche Aspekte abgefragt, um die Ausgangsbedingungen und den Fahrstil der Probanden zu erheben. Bei der Auswahl der Fragen, Skalen und Konstrukte wurde sich an früheren Studien orientiert (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018; VON BELOW, 2016). Konkret umfasst der Fragebogen folgende Bereiche:

Verkehrsbiografie und -demografie:

Dieser Fragebogenteil beinhaltet folgende Items: Lernzeitpunkt des Radfahrens, Häufigkeit des Radfahrens, längere Zeiten ohne Fahrradfahren, Art des Fahrrads, Helmtragen, typische Fahrwege, Streckenlängen und Umgebungen, bevorzugte Geschwindigkeit.

Motive des Radfahrens:

Motive sind handlungsleitend und führen in Kombination mit den Einstellungen und der konkreten Situation zum gezeigten Verhalten. Umwelteinflüsse und Erfahrungen können zur Veränderung der Motive führen. In diesem Fragebogenteil werden die Motive des Radfahrens mit 14 dichotomen Items erfasst. Diese lassen sich gemäß VON BELOW (2016) den drei Faktoren „Flexibles, günstiges Verkehrsmittel“, „Spaß und Gesundheit“ sowie „Keine Alternative zur Radnutzung“ zuordnen, die insgesamt 48,81 % der Gesamtvarianz aufklären. Zum Vergleich der Faktoren werden die Nennungen pro Faktor aufaddiert und durch die Anzahl der Items pro Faktor dividiert.

Zutrauen von bestimmten Verkehrssituationen (Handlungskompetenzerwartung):

Bei diesem Konstrukt geht es um eine persönliche Einschätzung zum Verhalten in schwierigen Verkehrssituationen (HOLTE, 2012). Anhand von fünf fahrradspezifischen Situationen konnten die Probanden mittels einer zehnstufigen Skala angeben, inwiefern sie sich das genannte Verhalten zutrauen (z. B. Fahren auf einer sehr engen Fahrspur) (VON BELOW, 2016).

Meiden widriger Fahrbedingungen (Risikowahrnehmung):

Die subjektive Wahrnehmung eines Risikos, die zum Vermeiden solcher Situationen führen kann, unterscheidet sich deutlich zwischen verschiedenen Personen. Mit diesem Fragebogenteil wurde die subjektive Risikowahrnehmung indirekt mittels verschiedenen widrigen Fahrbedingungen (z. B. Dunkelheit, starke Steigungen, große Städte etc.) erfasst, die „nie“, „eher nicht“, „wenn möglich“ oder „grundsätzlich“ gemieden werden können. Im Vergleich zur Studie VON BELOW (2016) wurde hier die subjektive Risikowahrnehmung nur mittels neun (statt 21) Items erfasst. Auf eine Neubildung der Faktorenlösung wurde angesichts

der kleinen Stichprobe verzichtet, so dass die Auswertung auf Einzel-Item-Ebene vorgenommen wurde.

Potenziell kritische Verkehrssituationen beim Fahrradfahren (Fahrverhalten):

Alternativ zur Erfassung seltener Einzelereignisse wie Verkehrsunfälle kann eine Vielzahl von Verhaltensweisen (hier: riskantem Fahrverhalten) zu einem Gesamtwert als Kriterium zusammengefasst werden (EPSTEIN, 1979). So konnte bei anderen Verkehrsteilnehmergruppen ein Zusammenhang zwischen riskanten Fahrverhaltensweisen, die mit mehreren Einzelitems erfasst wurden, und einer tatsächlichen Unfallbeteiligung dargestellt werden. Wie bei VON BELOW (2016) wurde auch in der vorliegenden Studie riskantes Fahrverhalten mittels 30 Items erfasst. Die Probanden konnten auf einer vierstufigen Skala („noch nie“, „selten“, „ab und zu“ und „häufig“) angeben, wie oft sie das Verhalten gezeigt bzw. die dargestellten Situationen erlebt hatten. In der Studie VON BELOW (2016) ergab eine Faktorenanalyse mit Varimax-Rotation fünf Faktoren, die zusammen 47,8 % Gesamtvarianz aufklären, wobei drei Items (7, 17 und 23) ausgeschlossen wurden: Faktor I Bewusst riskantes Verhalten (neun Items), Faktor II Riskantes Verhalten anderer (sechs Items), Faktor III Regelwidrige Wegenutzung (vier Items), Faktor IV Unvorsichtigkeit (vier Items) und Faktor V Fahrfehler (vier Items).

Erfahrung mit Fahrradunfällen:

Die bisherige Erfahrung mit Fahrradunfällen wurde mittels zwei Items (Alleinunfälle vs. Unfälle mit anderen Verkehrsteilnehmern) in Bezug auf die letzten drei Jahre erhoben.

Allgemeine Fragen zur Gesundheit:

Mit diesem Fragebogenteil wurde erfasst, ob i. d. R. eine Seh- oder Hörhilfe verwendet wird und ob eine Farbsehschwäche oder eine Bewegungsbeeinträchtigung vorliegt. Darüber hinaus sollte das Ausmaß von Reiseübelkeitsbeschwerden angegeben werden.

Gesundheits- oder altersbedingtes Fahrerleben und -verhalten beim Radfahren:

Anhand von zehn möglichen gesundheitlichen Beschwerden (z. B. erhöhte Blendempfindlichkeit, verringerter Gleichgewichtssinn, verringertes Kopfdrehungsvermögen etc.) wurde erhoben, inwiefern diese zu einer Beeinträchtigung beim Fahrradfahren führten. Darüber hinaus konnten eigene, nicht aufgelistete Beschwerden genannt werden, die zu einem beeinträchtigten Fahrverhalten führten. Die gewählte Antwortskala ist vierstufig (gar nicht – etwas – deutlich – stark). Schließlich sollte die Fahrperformanz bzw. das Fahrverhalten im Vergleich zu früher – vor 20 Jahren – selbst eingeschätzt werden. Zu beiden Items wurden fünf Antwortkategorien vorgegeben (viel schlechter – etwas schlechter – genauso (gut) – etwas besser bzw. riskanter – viel besser bzw. riskanter).

Schlafverhalten und aktuelle Müdigkeit:

Dieser Fragebogenteil umfasst sowohl die Schlaflänge der letzten Nacht als auch die übliche durchschnittliche Schlaflänge (beides in Stunden). Zudem wurde anhand der ins Deutsche übersetzten Karolinska Sleepiness Scale (AKERSTEDT & GILLBERG, 1990) die aktuelle Ausprägung der Müdigkeit erhoben. Die neunstufige Antwortskala umfasst verbal beschriebene Kategorien mit den Polen 1 „extrem wach“ bis 9 „sehr müde; große Anstrengung erforderlich, um wach zu bleiben; kämpfe gegen das Einschlafen“. Die Karolinska Sleepiness Scale kam insgesamt zweimal zum Einsatz: Vor der ersten Übungsfahrt im Vorher-Fragebogen und nach der Testfahrt im Kurz-Fragebogen.

Momentaner Gesundheitszustand und Einnahme von Substanzen:

Das erste Item bezieht sich auf akute gesundheitliche Probleme. Weiterhin wurde die Einnahme von Substanzen (Medikamente, Alkohol, sonstige Drogen) in den letzten 48 Stunden abgefragt.

Simulatorkrankheit (Simulator Sickness): Das mögliche Auftreten typischer Symptome der Simulatorkrankheit wurde sowohl vor den Fahrten (im Vorher-Fragebogen) als auch nach der zweiten Übungsfahrt sowie nach der Testfahrt überprüft. Die Items zur Erfassung dieser Symptome orientieren sich dabei an der deutschen Übersetzung (NEUKUM & GRATTENTHALER, 2006) des Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) von (KENNEDY et al., 1993). NEUKUM und GRATTENTHALER (2006) extrahierten wie auch KENNEDY et al. (1993) aus den 16 Items drei Faktoren, jedoch mit einer eindeutigeren Item-Faktor-Zuordnung: Faktor I Übelkeit (6 Items), Faktor Okulomotorik (7 Items) und Faktor III Desorientierung (3 Items). Für die vorliegende Studie wurden die Items „verschwommenes Sehen“ und „Schwierigkeiten, scharf zu sehen“ zu einem Item (Unscharfes/verschwommenes Sehen) zusammengefasst, so dass der hier verwendete Fragebogen insgesamt 15 Items und der Faktor II nun 6 statt 7 Items umfasst.

Fahrtüchtigkeit:

Im letzten Item sollten die Probanden angeben, ob Sie zum Zeitpunkt der Befragung Zweifel an ihrer Fahrtüchtigkeit hatten. Bei Zustimmung hätte keine Fahrt mit dem Fahrradsimulator stattgefunden.

Kurzfragebogen (nach den drei Übungsfahrten und der Testfahrt)

Nach den drei Übungsfahrten und der Testfahrt wurde jeweils ein kurzer Fragebogen (ca. 2–5 min Bearbeitungszeit) vorgelegt, um die Selbstwahrnehmung der eigenen Fahrt sowie mögliche Symptome der Simulatorkrankheit zu erheben.

Erfahrungen mit dem Fahrradsimulator:

Dieser Fragebogenteil beinhaltet in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke fünf bis acht Items zu folgenden Inhalten: Spaß an der Simulatorfahrt; Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator; körperliche Anstrengung; Anstrengung, im virtuellen Raum aufmerksam den Verkehr zu beobachten bzw. sich zu orientieren; Selbsteinschätzung zur Lösung der Fahraufgaben bzw. der Herausforderungen im Stadtverkehr (wurde nicht nach erster Übungsfahrt gestellt); Einschätzung, wie gut der Fahrradparcours bzw. die Stadtstrecke zum Üben mit dem Fahrradsimulator war (nur nach 2. und 3. Übungsfahrt gestellt); Einschätzung, wie gut man sich auf die eigentliche Testfahrt vorbereitet fühlt (nur nach 3. Übungsfahrt gestellt); Spaß an der Weiterfahrt bzw. an einem zukünftigen Fahrradsimulatorprojekt teilzunehmen.

Simulatorkrankheit (Simulator Sickness):

Wie oben erwähnt, wurden mögliche Symptome der Simulatorkrankheit dreimal im Verlauf erhoben: im Vorherfragebogen (pre), im Kurzfragebogen nach der zweiten Übungsfahrt (intra) sowie nach der Testfahrt (post).

Aktuelle Müdigkeit (Karolinska Sleepiness Scale):

Ebenfalls wurde die aus einem Item bestehende Karolinska Sleepiness Scale nach der Testfahrt (post) – zusätzlich zum Vorherfragebogen (pre) – erneut abgefragt (s. o.).

Anmerkungen/offene Fragen:

Nach jeder Fahrt bestand die Möglichkeit, zusätzlich zu den geschlossenen Fragen auch im Freitext Anmerkungen zu notieren. Im Anschluss an die Testfahrt wurde zudem explizit dazu aufgefordert aufzuschreiben, was noch verbessert werden sollte bzw. was einem gut gefallen hat.

Abschluss-Fragebogen (nach der Testfahrt)

Im Abschluss-Fragebogen sollte schließlich bewertet werden, als wie realistisch das Fahren mit dem Fahrradsimulator im Vergleich zum Fahren mit einem realen Fahrrad empfunden wurde. Neben den geschlossenen Fragen bestand am Ende jedes Fragebogenteils die Möglichkeit, im Freitext Anmerkungen zu notieren.

Zum Fahrgefühl:

Das Fahrgefühl wurde anhand von acht Items zu verschiedenen Aspekten (geradeaus fahren, Kurven fahren, beschleunigen, bremsen, Steigung fahren, Wirkung der Gangschaltung, Wirkung des Elektromotors/Pedelec, Geschwindigkeitsgefühl insgesamt) mit einer 15-stufigen Skala von 1 = „sehr wenig realistisch“ bis 15 = „sehr realistisch“ erfasst. Bei den Items „Steigung fahren, Wirkung der Gangschaltung sowie Wirkung des Elektromotors“ konnte zudem „keine Angabe“ als Antwortalternative gewählt werden.

Zum Verkehrsszenario und den anderen Verkehrsteilnehmern:

Dieser Fragebogenteil umfasst insgesamt 10 Items: Häuser/Straßen – grafische Darstellung, Streckenführung; Autos – grafische Darstellung/- Geräusche/- Fahrverhalten; Andere Radfahrer - grafische Darstellung/- Fahrverhalten; Fußgänger - grafische Darstellung/- Bewegung; Umgebung – Geräusche. Auch hier konnten die Probanden wieder mittels einer 15-stufigen Skala bewerten, wie realistisch diese Aspekte umgesetzt wurden.

Zur technischen Umsetzung: In diesem Fragebogenteil geht es um den „Bildfluss der Simulation“ und die „Übertragung der (körperlichen) Bewegung auf die (digitale) Simulation“, die beide auf einer 15-stufigen Antwortskala bewertet werden konnten (1 = „sehr stockend“ bis 15 = „sehr flüssig“ bzw. 1 = „stark zeitverzögert“ bis 15 = „völlig unmittelbar“).

Zum Fahrverhalten auf dem Fahrradsimulator:

Mittels 4 Items und einer 15-stufigen Antwortskala konnten die Probanden einschätzen, wie das eigene Fahrverhalten auf dem Fahrradsimulator im Vergleich zum realen Fahren erlebt wurde: Geschwindigkeit („viel langsamer“ bis „viel schneller“), auf geraden Strecken („viel unsicherer“ bis „viel sicherer“), in Kurven („viel unsicherer“ bis „viel sicherer“) und die Regelbeachtung der StVO („viel weniger korrekt“ bis „viel korrekter“).

Abschließende Gesamtbewertung:

Zum Schluss sollte zusammenfassend bewertet werden, inwiefern das Eintauchen in die virtuelle Umgebung gelang (15-stufige Antwortskala von „gelingt gar nicht“ bis „gelingt sehr gut“). Weiterhin sollte der Realismus insgesamt mit einer 15-stufigen Antwortskala von „sehr wenig realistisch“ bis „sehr realistisch“ bewertet werden.

5.5.3 Verhaltensbeobachtung, -einschätzung und -dokumentation

Die Versuchsleiter haben während der Simulatorfahrten ihre Verhaltensbeobachtungen und -einschätzungen in einem Dokumentationsbogen (Anhang IV) festgehalten. So wurde bei den drei Übungsfahrten jeweils auf einer Skala von 1–15 grob eingeschätzt, wie gut die Probanden gefahren sind, ob Anzeichen von Unverträglichkeit gezeigt wurden und ob sich die Strecke zu Übungszwecken für den Probanden bewährt hatte.

Bei der Testfahrt wurden darüber hinaus für alle Streckenabschnitte (s. Kapitel 5.4.4) folgende beobachtete Fahrfehler dokumentiert:

- Spur verlassen
- Kollision
- Verkehrsführung missachtet (Vorfahrt, Lichtsignalanlage)

- Navigationsansage missachtet bzw. falsch abgebogen
- Handzeichen fehlt, verzögert oder unklar
- Andere Verkehrsteilnehmer nicht im Blick gehabt

Zusätzlich wurden Fahrunsicherheiten anhand der folgenden beiden Kategorien beurteilt:

- Unsicheres Fahren
- Übervorsichtiges Fahren

Des Weiteren wurden die Probanden bei 13 von 19 Streckenabschnitten (insbesondere bei kritischen und unangenehmen Verkehrsszenen sowie bei geforderten Abbiegemanövern) während der Fahrt gefragt, wie kritisch bzw. wie realistisch sie die gerade erlebte Verkehrssituation empfunden hatten? Beide Fragen sollten mit einer Zahl von 0 (= sehr unkritisch bzw. sehr unrealistisch) bis 10 (= sehr kritisch bzw. sehr realistisch) kurz und knapp beantwortet werden. Zur Unterstützung war die Antwortskala auf dem Fahrradlenker angebracht (Bild 17). Die Dokumentation der Antworten erfolgte durch den Versuchsleiter.



Bild 17: Antwortskala zur Einschätzung der Verkehrsszene mittig am Lenker

5.5.4 Automatische Datenaufzeichnung durch SILAB

Wie im Kapitel 5.1 dargestellt, ist der Fahrradsimulator mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet, die das Fahrverhalten des Probanden (Treten, Bremsen, Lenken, Schalten) messen. Mittels SILAB werden diese Messdaten zusammen mit der Fahrradposition und -bewegung auf der virtuellen Strecke verrechnet, so dass verschiedene Fahr-Parameter (z. B. Geschwindigkeit, laterale Position, Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug) in einer Frequenz von 100 kHz erfasst und automatisch abgespeichert werden können. Die automatische Datenaufzeichnung wurde bei der Teststrecke eingeschaltet, wobei für die vorliegende Studie nur der Parameter Geschwindigkeit ausgewertet wurde.

5.6 Statistische Analysen

Die statistischen Auswertungen wurden mit der Software IBM SPSS Statistics for Windows (Version 25) durchgeführt. In Abhängigkeit vom Skalenniveau wurden zum Vergleich der Untersuchungsgruppen χ^2 -Tests bei Nominaldaten, Mann-Whitney-U-Tests bei Ordinaldaten und t-Tests bei Intervalldaten durchgeführt. Waren die Voraussetzungen für einen T-Test wie Normalverteilung und Varianzhomogenität nicht erfüllt, dann erfolgte auch hier die Signifikanzprüfung mit einem Mann-Whitney-U-Test.

Wurde eine Hypothese mit mehreren Mittelwertvergleichen geprüft, dann wurden multivariate Varianzanalysen durchgeführt. Bei Vergleich der beiden Untersuchungsgruppen zu mehreren Erhebungszeitpunkten wurden einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung gerechnet. Da Varianzanalysen relativ robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung sind, wurde bei multivariaten Verfahren auf ein voraussetzungsfreieres Ersatzverfahren verzichtet (PAGANO, 2010; SALKIND, 2010; WILCOX, 2012). Generell erfolgten die Signifikanzprüfungen zweiseitig auf einem Signifikanzniveau von 5 %.

Als Maß der Effektstärke wird bei χ^2 -Tests Cramer's V angegeben, welches Werte zwischen 0 und 1 einnehmen kann. Dabei gelten folgende Grenzwerte: sehr kleiner Effekt: $V < 0.2$; kleiner Effekt: $0.2 \leq V < 0.5$; mittlerer Effekt: $0.5 \leq V < 0.7$; großer Effekt: $V \geq 0.7$ (WITTENBERG et al., 2014). Bei Mann-Whitney-U-Tests und t-Tests wurde Cohen's d als Maß der Effektstärke berechnet, welches – unter Berücksichtigung, dass d sowohl positiv, als auch negative Werte aufweisen kann – folgendermaßen interpretiert werden kann (COHEN, 1988): kleiner Effekt: $|d| \geq 0.2$; mittlerer Effekt: $|d| \geq 0.5$; großer Effekt: $|d| \geq 0.8$. Bei Varianzanalysen wird das partielle Eta-Quadrat als Maß der Effektstärke und Varianzaufklärung angegeben.

6 Ergebnisse

Zunächst wird im Kapitel 6.1 die untersuchte Stichprobe vorgestellt. Neben den Basisdaten (Alter, Geschlecht, Simulatorerfahrung) werden die Ergebnisse zum Vorherfragebogen präsentiert. Im Kapitel 6.2 werden Ergebnisse zur Abbruchquote (Anteil der Drop-outs) dargelegt. In den folgenden Kapiteln fokussiert die Ergebnisdarstellung auf die „Studien-Completer“, differenziert nach den beiden Untersuchungsgruppe EG und KG. So werden im Kapitel 6.3 die Verlaufsdaten zu den vier Simulatorfahrten erläutert, die sowohl aus Sicht der Probanden als auch aus Sicht der Versuchsleiter erhoben wurden. Darauffolgend werden im Kapitel 6.4 detaillierte Ergebnisse zur vierten Simulatorfahrt, der eigentlichen Testfahrt, berichtet. Schließlich erfolgt im Kapitel 6.5 die Ergebnisdarstellung zum Abschluss-Fragebogen.

6.1 Stichprobenbeschreibung

6.1.1 Basisdaten

Für die erste Machbarkeitsstudie des Fahrradsimulators konnten insgesamt 66 Probanden gewonnen werden. Diese teilen sich auf die beiden Untersuchungsgruppe wie folgt auf: 35 Senioren in der Experimentalgruppe (EG) und 31 Probanden im Alter von 25–50 Jahren in der Kontrollgruppe (KG).

Geschlecht:

Während in der KG die Geschlechtsverteilung nahezu ausgewogen ist (Bild 18), überwiegen bei den Senioren mit 65,7 % die männlichen Probanden. Dieser Unterschied in der Häufigkeitsverteilung ist nicht signifikant: $\chi^2(1) = 2.021, p = .155; V = .175$.

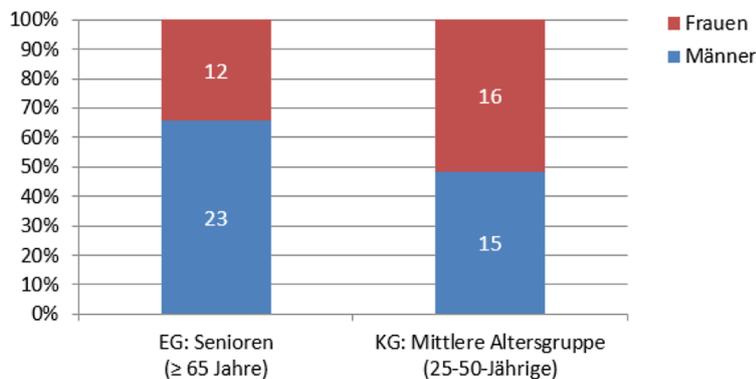


Bild 18: Geschlechtsverteilung

Alter:

Die Senioren der EG weisen einen Altersdurchschnitt von 72,43 Jahren auf (SD = 5,93). Die Altersspanne reicht von 65 bis 89 Jahren. In der KG liegt der Altersdurchschnitt bei 38,42 Jahren (SD = 7,01; Altersspanne: 25–50 Jahre). Dieser Altersunterschied ist bedingt durch die Gruppendifinition sehr signifikant: $t(64) = 21,340; p < .001, d = 5,24$

Simulatorerfahrung:

8 von 35 Senioren (22,9 %) waren bereits zuvor mit dem Pkw-Fahrsimulator gefahren, ohne dass sie relevante Symptome der Simulatorkrankheit gezeigt hatten. In der KG liegt der Anteil der Personen, die bereits über Simulatorerfahrung verfügten, sogar bei 58,1 %

(n = 18), wobei ein Proband zum Ende der langen Testfahrt mit dem Pkw-Fahrsimulator aufgrund von leichten Simulatorkrankheitssymptomen abbrechen musste. Die beiden Untersuchungsgruppen unterscheiden sich in ihrer Simulatorerfahrung signifikant voneinander ($\chi^2(2) = 8,930$; $p = .012$; $V = .368$) (siehe auch Kapitel 6.2.1)

6.1.2 Probandenbeschreibung (Selbsturteil)

Die Probandenbeschreibung basiert auf den Auswertungen des Vorher-Fragebogens. Diese wurde von allen 66 Probanden ausgefüllt, jedoch kommen durch fehlende Angaben der Probanden einzelne Missings auf Itemebene vor. Die Bearbeitungszeit für den Vorherfragebogen schwankte je nach Teilnehmer zwischen 14 und 66 Minuten. Die Senioren brauchten signifikant mehr Zeit für die Beantwortung des umfangreichen Fragebogens (EG: $MW = 46,16$; $SD = 8,90$; KG: $MW = 30,73$; $SD = 11,09$; $t(55) = 5,829$; $p < .001$, $d = 1,54$). Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Vorher-Fragebogen dargestellt.

Alter beim Erlernen des Fahrradfahrens:

Die Senioren waren mit einem Altersdurchschnitt von 7,46 Jahren ($SD = 4,44$) signifikant älter beim Erlernen des Fahrradfahrens als die Probanden der Kontrollgruppe mit einem Altersdurchschnitt von 5,17 Jahren ($SD = 1,10$; $U = 276,000$; $p = .006$, $d = 0,74$). Aufgrund der großen Altersdifferenzen zwischen den Gruppen als auch innerhalb der Gruppen ist das für die Fahrerfahrung jedoch nicht relevant.

Häufigkeit des Fahrradfahrens:

Zehn Senioren (28,6 %) gaben an, täglich oder fast täglich Fahrrad zu fahren. Zwölf Senioren (34,3 %) fahren mehrmals pro Woche Fahrrad, 6 Senioren (17,1 %) fahren mehrmals pro Monat und 7 Senioren (20,0 %) fahren seltener Fahrrad. In der KG verteilen sich die Anteile wie folgt: (fast) täglich (n = 3; 9,7 %), mehrmals pro Woche (n = 13; 41,9 %), mehrmals pro Monat (n = 8; 25,8 %) und seltener (n = 7; 22,6 %). Es lässt sich in der Häufigkeit des Fahrradfahrens kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen feststellen ($U = 441,500$; $p = .176$, $d = 0,32$).

Längere Zeiten ohne Fahrradfahrpraxis:

11 Senioren (31,4 %) haben eigenen Angaben zufolge eine längere Phase von mindestens 5 Jahren erlebt, in denen sie kein Fahrrad gefahren sind. In der Kontrollgruppe stimmten nur 4 Probanden (12,9 %) dieser Aussage zu, was einem marginal signifikanten Gruppenunterschied bei kleiner Effektstärke entspricht ($\chi^2(1) = 3,213$, $p = .073$; $V = .221$). Auf die Folgefrage hin, seit wann nach dieser Pause wieder Fahrrad gefahren wird, gab die Mehrheit der Senioren dieser Teilgruppe (n = 6; 54,5 %) an, dass sie seit mindestens 10 Jahren wieder Fahrrad fährt. Jeweils 2 Senioren (18,2 %) fahren seit einem Jahr bzw. seit 1–5 Jahren wieder Fahrrad, 1 Proband fährt seit 5–10 Jahren wieder Fahrrad. Von der KG hat jeweils ein Proband (25,0 %) diese Folgefrage mit einer der Antwortkategorien „seit 1–5 Jahren“, „seit 5–10 Jahren“, „seit mehr als 10 Jahren“ sowie „weiß nicht“ beantwortet.

Fahrradart (Mehrfachnennungen möglich):

Am häufigsten fahren die Probanden beider Gruppen ein normales CityBike/Hollandrad/Trekkingrad/Tourenrad (EG: n = 29; 82,9 %/KG: n = 25; 80,6 %). Bei den Senioren folgt an zweiter Stelle das Pedelec (n = 8; 22,9 %), das nur von 3 Probanden der KG gefahren wird (9,7 %). Fünf Probanden der KG gaben als zweithäufigstes ein Mountainbike an (16,1 %), das nur 3 Probanden der EG fahren (8,6 %). Rennrad (EG: n = 2; 5,7 %; KG: n = 2; 6,5 %), Klapprad/Faltrad (EG: n = 2; 5,7 %; KG: n = 0; 0,0 %) und Anderes – hier: Tandem – (EG: n = 1; 2,9 %; KG: n = 1; 3,2 %) wurden nur vereinzelt genannt.

Tragen eines Fahrradhelms:

Auf die Frage, wie häufig beim Radfahren ein Helm getragen wird, gaben über die Hälfte der Senioren (n = 21; 60,0 %) „fast immer“ an, während nur 12 Probanden (38,7 %) der Kontrollgruppe den Helm eigenen Angaben zufolge „fast immer“ tragen. Jeweils 5 Probanden aus beiden Gruppen tragen den Helm „manchmal“ (14,3 % vs. 16,1 %) und 2 Probanden „selten“ (5,7 % vs. 6,5 %). Zwölf Probanden der KG (38,7 %) gaben an, „nie“ einen Helm zu tragen; in der EG trifft das nur auf 7 Probanden (20,0 %) zu. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist marginal signifikant ($U = 409,500$; $p = .063$, $d = 0,43$).

Typische Fahrtwege:

Wie man Bild 19 entnehmen kann, gaben die Senioren bei typischen Fahrtwegen an erster Stelle „Fahrradausflüge“ (n = 26; 74,3 %), an zweiter Stelle „im Urlaub“ (n = 22; 62,9 %) und an dritter Stelle „andere kurze Wege“ (n = 20; 57,1 %) an. Auch die Probanden der KG nannten diese drei Fahrtwege am häufigsten nur in anderer Reihenfolge: „andere kurze Wege“ (n = 22; 71,0 %), „Fahrradausflüge“ (n = 19/61,3 %) und „im Urlaub“ (n = 13; 41,9 %). Naturgemäß deutliche Unterschiede zeigen sich bei den Antwortkategorien „Arbeit, Studium u. ä.“ (EG: n = 2; 5,7 %/KG: n = 11; 35,5 %; $\chi^2(1) = 9,211$, $p = .002$; $V = .374$) und „um Kinder zu begleiten“ (EG: n = 5; 14,3 %/KG: n = 9; 29,0 %; $\chi^2(1) = 2,139$, $p = .114$; $V = .180$), die von den Probanden der KG häufiger genannt wurden. Dafür nutzen Senioren das Fahrrad häufiger als Sportgerät (EG: n = 13; 37,1 %/KG: n = 8; 25,8 %; $\chi^2(1) = .0974$, $p = .324$; $V = .121$).

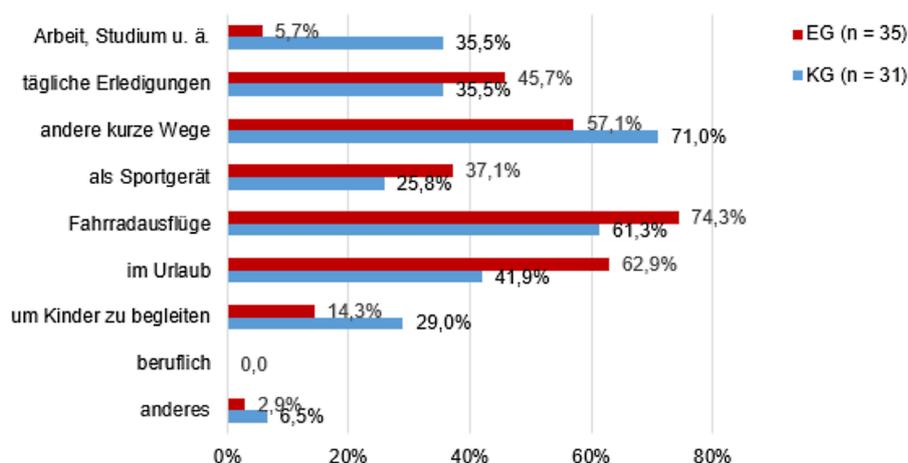


Bild 19: Vorher-Fragebogen – Typische Fahrtwege

Streckenlängen und -umgebungen:

Passend zur oben genannten häufigen Nutzung des Fahrrads für Fahrradausflüge und als Sportgerät gaben Senioren im Vergleich zur KG signifikant häufiger an, Strecken mit einer Länge von 5–20 km ($U = 297,500$; $p = .050$, $d = 0,51$) sowie von mehr als 20 km regelmäßig zu fahren ($U = 229,000$; $p = .003$, $d = 0,80$). So fahren 25,8 % der Senioren wöchentlich und 3,2 % sogar täglich eine Strecke von mehr als 20 km, während keiner der Probanden der Kontrollgruppe so häufig eine lange Strecke fährt (Tabelle 3). Tendenziell sind die Probanden der KG häufiger in Großstädten unterwegs, wohingegen die älteren Probanden signifikant häufiger in ländlicher Umgebung Fahrrad fahren ($U = 253,500$; $p = .012$, $d = 0,67$).

		(fast) tägl.	wöchentlich	monatlich	seltener	nie
Streckenlänge						
< 5 km	EG	37,5 %	16,7 %	16,7 %	29,2 %	0,0 %
	KG	20,0 %	36,0 %	32,0 %	12,0 %	0,0 %
5–20 km	EG	14,8 %	40,7 %	18,5 %	22,2 %	3,7 %
	KG	6,5 %	22,6 %	25,8 %	38,7 %	6,5 %
> 20 km	EG	3,2 %	25,8 %	12,9 %	51,6 %	6,5 %
	KG	0,0 %	0,0 %	19,2 %	46,2 %	34,6 %
Umgebungen						
Großstadt	EG	14,3 %	21,4 %	7,1 %	42,9 %	14,3 %
	KG	24,1 %	24,1 %	17,2 %	17,2 %	17,2 %
Stadt < 100.000 EW	EG	29,2 %	16,7 %	8,3 %	41,7 %	4,2 %
	KG	3,7 %	14,8 %	33,3 %	37,0 %	11,1 %
Dorf < 5000 EW	EG	14,3 %	19,0 %	19,0 %	38,1 %	9,5 %
	KG	0,0 %	12,0 %	20,0 %	48,0 %	20,0 %
Ländliche Umgebung	EG	19,4 %	22,6 %	12,9 %	45,2 %	0,0 %
	KG	0,0 %	11,5 %	26,9 %	42,3 %	19,2 %

Tab. 3: Vorher-Fragebogen – Häufigkeit von gefahrenen Streckenlängen und -umgebungen

Bevorzugte Fahrgeschwindigkeit:

Fast ein Drittel der Senioren ($n = 10$; 30,3 %) fährt i. d. R. mit einer gemächlichen Geschwindigkeit von bis zu 15 km/h und nur 1 Senior gab an, i. d. R. mehr als 25 km/h zu fahren (Bild 20). In der Kontrollgruppe fahren tendenziell mehr Probanden i. d. R. schneller. So fahren 9,7 % der 25–50-jährigen ($n = 3$) ihren Angaben zufolge i. d. R. mehr als 25 km/h, wobei der angegebene Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Gruppen nur marginal signifikant ist ($U = 401,500$; $p = .060$, $d = 0,38$).

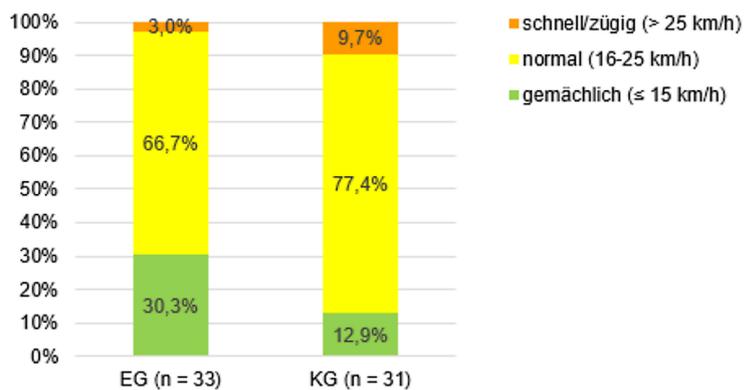


Bild 20: Vorher-Fragebogen – Bevorzugte Fahrgeschwindigkeit

Motive für das Fahrradfahren:

Die drei am häufigsten genannten Motive für das Fahrradfahren sind bei den Senioren auf Einzelitemebene „um gesund und fit zu bleiben“ ($n = 29$; 82,9 %), „aus Spaß am Radfahren“ ($n = 27$; 77,1 %) und „weil es Spaß macht, gemeinsam mit Partner/Freunden/Familie zusammenzufahren“ ($n = 23$; 65,7 %). Diese drei Items laden alle auf dem Faktor II ‚Spaß und Gesundheit‘ hoch. In der Kontrollgruppe wurde das Motiv ‚um gesund und fit zu bleiben‘ ebenfalls am häufigsten genannt ($n = 23$; 74,2 %). Danach folgen auf den Rängen zwei und drei jedoch praktische Erwägungen: „weil man damit in der Stadt

schneller vorwärts kommt“ (n = 20; 64,5 %) und „weil man damit keine Parkplatzprobleme hat“ (n = 22; 71,0 %), womit sie sich signifikant von den Probanden der EG differenzieren, die diese Motive seltener nannten (jeweils zu 40,0 %). Während die letzten beiden Items dem Faktor I „flexibles und günstiges Verkehrsmittel“ zuzuordnen sind, laden die drei genannten Hauptmotive der Senioren auf dem Faktor II „Spaß und Gesundheit“. Vergleicht man die Gruppen auf Faktorebene, dann zeigt sich passend dazu, dass die Probanden der Kontrollgruppe signifikant häufiger Motive des Faktors I „flexibles und günstiges Verkehrsmittel“ nannten (EG: $MW = 0,34$; $SD = 0,37$ /KG: $MW = 0,54$; $SD = 0,34$; $U = 361,000$; $p = .017$, $d = 0,60$), während die Probanden der EG zumindest tendenziell häufiger Motive des Faktors II „Spaß und Gesundheit“ angaben (EG: $MW = 0,58$; $SD = 0,23$ /KG: $MW = 0,47$; $SD = 0,27$; $U = 414,500$; $p = .088$, $d = 0,41$). Am seltensten wurden in beiden Gruppen Motive des Faktors III „keine Alternative zur Radnutzung“ genannt (EG: $MW = 0,03$; $SD = 0,08$ /KG: $MW = 0,06$; $SD = 0,12$).

Zutrauen von bestimmten Verkehrssituationen (Handlungskompetenzerwartung):
Bild 21 zeigt, inwiefern sich die Probanden bei fünf vorgegebenen Verkehrssituationen zutrauen, diese zu meistern. Die Antwortskala geht von 1 bis 10, wobei ein hoher Wert für ein hohes Zutrauen im Sinne von hoher Handlungskompetenzerwartung steht. Deskriptiv lässt sich feststellen, dass sich die Probanden der KG im Durchschnitt eine höhere Handlungskompetenzerwartung zuschreiben als die der EG. Der Haupteffekt „Gruppe“ lässt sich statistisch jedoch nicht absichern ($F(5, 40) = 1.026$; $p = .416$, $\eta^2_{\text{part}} = .114$). Zumindest tendenziell ($p = .058$, $\eta^2_{\text{part}} = .079$) gaben die KG-Completer beim Item „sicheres Fahren nach Alkoholkonsum“ höhere Werte an (EG: $MW = 3,60$; $SD = 3,00$ /KG: $MW = 5,32$; $SD = 3,06$).

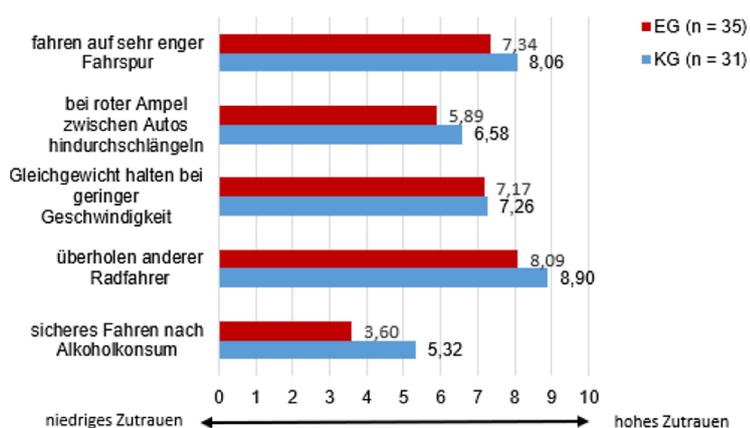


Bild 21: Vorher-Fragebogen – Handlungskompetenzerwartung: Zutrauen von bestimmten Verkehrssituationen

Meiden widriger Fahrbedingungen (Risikowahrnehmung):

In Tabelle 4 ist dargestellt, wie häufig die Probanden bestimmte widrige Fahrbedingungen meiden. Insbesondere bei „Schnee oder Glätte“ und „Unwohlsein“ gaben sowohl viele Probanden der EG als auch der KG an, das Fahrradfahren „wenn möglich“ oder sogar „grundsätzlich“ zu meiden. Signifikant häufiger im Vergleich zu den Probanden der Kontrollgruppe vermeiden die Senioren das Fahrradfahren in großen Städten ($U = 371,000$; $p = .028$, $d = 0,53$). Mögliche Unterschiede bezüglich des Wohnortes wurden nicht ausgewertet. Weitere deutliche Unterschiede zeigen sich – wenn auch nicht signifikant – bei Dunkelheit/schlechte Sicht (wenn möglich vermeiden – EG: 45,7 % > KG: 29,0 %), unbekannte Strecken (wenn möglich + grundsätzlich vermeiden: EG: 29,4 % > KG: 6,5 %), unbekanntes Fahrrad (wenn möglich vermeiden – EG: 42,9 % > KG: 19,4 %), und Müdigkeit (wenn möglich + grundsätzlich vermeiden: EG: 51,4 % > KG: 35,5 %). Die Probanden der KG geben häufiger als die der EG an, dass sie Schnee oder Glätte meiden (wenn möglich + grundsätzlich vermeiden: EG: 71,4 % < KG: 90,0 %).

		Meiden des Fahrradfahrens			
Widrige Fahrbedingung		nie	eher nicht	wenn möglich	grundsätzlich
Dunkelheit/schlechte Sicht	EG	28,6 %	25,7 %	45,7 %	0,0 %
	KG	32,3 %	38,7 %	29,0 %	0,0 %
Regen	EG	11,8 %	35,3 %	44,1 %	8,8 %
	KG	0,0 %	38,7 %	51,6 %	9,7 %
Schnee oder Glätte	EG	14,3 %	14,3 %	34,3 %	37,1 %
	KG	0,0 %	0,0 %	67,7 %	32,3 %
Starke Steigungen	EG	25,7 %	20,0 %	42,9 %	11,4 %
	KG	16,1 %	38,7 %	45,2 %	0,0 %
große Städte	EG	35,5 %	29,4 %	29,4 %	5,9 %
	KG	51,6 %	41,9 %	6,5 %	0,0 %
unbekannte Strecken	EG	55,9 %	14,7 %	26,5 %	2,9 %
	KG	54,8 %	38,7 %	6,5 %	0,0 %
unbekanntes Fahrrad	EG	37,1 %	20,0 %	42,9 %	0,0 %
	KG	41,9 %	38,7 %	19,4 %	0,0 %
Müdigkeit	EG	14,3 %	34,3 %	40,0 %	11,4 %
	KG	19,4 %	45,2 %	25,8 %	9,7 %
Unwohlsein	EG	14,3 %	22,9 %	20,0 %	42,9 %
	KG	3,2 %	32,3 %	48,4 %	16,1 %

Tab. 4: Vorher-Fragebogen – Meiden widriger Fahrbedingungen (Risikowahrnehmung)

Potenziell kritische Verkehrssituationen beim Fahrradfahren (Riskantes Fahrverhalten): Wie bei von BELOW (2016) werden die Items zum (riskantem) Fahrverhalten zu fünf Faktoren zusammengefasst, deren Mittelwerte (Antwortskala von ,1 = „nie“ bis ,4 = „sehr häufig“) differenziert nach EG und KG im Bild 22 dargestellt sind. Den Angaben beider Probandengruppen zufolge kommt das riskante Verhalten anderer am häufigsten vor, gefolgt von (eigener) regelwidriger Wegenutzung. Ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen ergibt sich lediglich beim Faktor I: So geben die Probanden der KG mehr riskante eigene Fahrverhaltensweisen an als die der EG (EG: $MW = 1,44$; $SD = 0,39$ /KG: $MW = 1,67$; $SD = 0,41$; $U = 387,000$; $p = .045$, $d = 0,51$).

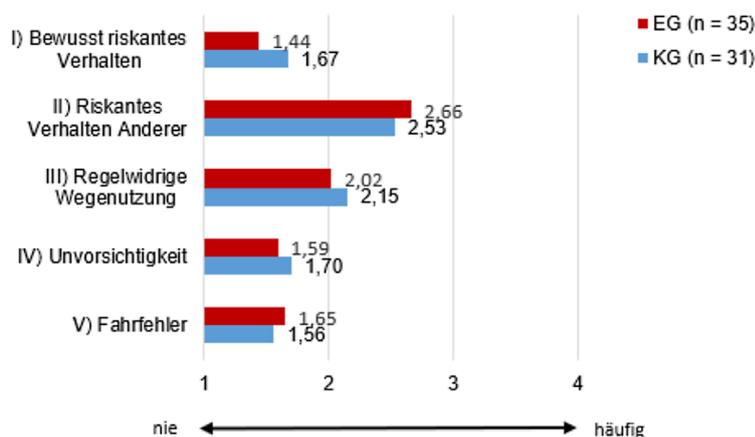


Bild 22: Vorher-Fragebogen – Riskantes Fahrverhalten und kritische Verkehrssituationen

Erfahrung mit Fahrradunfällen:

10 von 35 Senioren (28,6 %) haben in den letzten drei Jahren einen Alleinunfall erlebt, 4 Senioren (11,5 %) sogar zwei, drei oder mehr Alleinunfälle. Bei den Probanden der Kontrollgruppe waren 4 (12,9 %) von einem Alleinunfall betroffen, 3 (9,7 %) hatten zwei Alleinunfälle erlebt. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen ist nicht signifikant ($U = 450,500$; $p = .150$, $d = 0,29$). Unfälle mit anderen Verkehrsteilnehmern wurden in beiden Gruppen seltener genannt: 4 Probanden der EG (11,4 %) gaben einen Unfall an, 2 (5,7 %) nannten zwei Unfälle. In der Kontrollgruppe sind es 2 Probanden (6,5 %) mit einem Unfall sowie jeweils 1 Proband (3,2 %) mit zwei bzw. drei Unfällen. Auch hier zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($U = 422,500$; $p = .680$, $d = 0,39$).

Gesundheitliche Aspekte:

24 von 35 Senioren (68,6 %) tragen eine Brille oder Kontaktlinsen. Ein älterer Proband (4,0 %) berichtete eine Farbsehschwäche. 4 Senioren (16,0 %) gaben an, eine Hörhilfe zu nutzen und 3 (12,0 %) nannten Bewegungsbeeinträchtigungen (insb. Probleme mit den Gelenken). In der Kontrollgruppe verteilen sich die Anteile wie folgt: Brille/Kontaktlinse: $n = 17$ (54,8 %), Farbsehschwäche: $n = 2$ (6,5 %), Hörhilfe: $n = 1$ (3,2 %) und Bewegungsbeeinträchtigungen: $n = 2$ (6,5 %). Die χ^2 -Tests ergeben keine signifikanten Ergebnisse. Die Frage nach Reiseübelkeitsbeschwerden konnte mit einer Skala von 0 = „gar nicht“ bis 15 = „sehr stark“ beantwortet werden. Eigenen Angaben zufolge leiden die Probanden der EG signifikant weniger an Reiseübelkeitsbeschwerden als die der KG ($MW = 0,89$; $SD = 1,43$ versus $MW = 3,58$; $SD = 3,83$; $U = 291,000$; $p = .001$, $d = 0,87$), von der 7 Probanden mittelstarke bis starke Reiseübelkeitsbeschwerden angaben. Im Vergleich dazu nannte keiner der Senioren mittelstarke bis starke Beschwerden.

Gesundheits- oder altersbedingtes Fahrerleben und -verhalten beim Fahrradfahren:

Die Probanden konnten auf einer Skala von 1 = „gar nicht“ bis 4 = „stark“ angeben, inwiefern mögliche gesundheits- oder altersbedingte Beeinträchtigungen sich auf ihr Fahrverhalten auswirken. Die Mittelwerte zu allen genannten gesundheitlichen Beschwerden liegen im niedrigen Bereich zwischen 1,00 und 2,00. Die stärksten Beeinträchtigungen im Fahrverhalten erleben die Senioren im Durchschnitt durch eine erhöhte Blendempfindlichkeit ($MW = 1,94$; $SD = 0,84$), durch ein verringertes Kopfumdrehungsvermögen ($MW = 1,63$; $SD = 2,08$) und durch ein verringertes Hörvermögen ($MW = 1,62$; $SD = 0,77$). Die Senioren sind ihrer Aussage nach statistisch signifikant mehr durch ein verringertes Hörvermögen ($U = 423,500$; $p = .037$, $d = 0,34$) verringertes Kopfdrehungsvermögen ($U = 357,000$; $p = .004$, $d = 0,55$) sowie durch eine verringerte Muskelkraft ($U = 332,500$; $p = .004$, $d = 0,63$) beim Fahrradfahren beeinträchtigt als die 25–50-jährigen Probanden. Bei den Probanden der Kontrollgruppe fallen unter die ersten drei Beschwerden folgende: Blendempfindlichkeit ($MW = 1,65$; $SD = 0,76$), verminderte Sehschärfe ($MW = 1,39$; $SD = 0,76$) und Allergien ($MW = 1,35$; $SD = 0,49$), wobei letzteres unter den Probanden der KG als signifikant stärker beeinträchtigend erlebt wird als bei denen der EG ($U = 417,000$; $p = .027$, $d = 0,41$).

Eingeschätzte Fahrperformanz und -verhalten im Vergleich zum Alter mit 20 Jahren:

Die Probanden konnten sowohl ihre jetzige Fahrperformanz als auch ihr Fahrverhalten im Vergleich zum Alter mit 20 Jahren auf einer Skala von 1 = „viel schlechter“ bis 5 = „viel besser“ bzw. von 1 = „viel vorsichtiger“ bis 5 = „viel riskanter“ einschätzen. Im Vergleich zur KG gaben die Senioren signifikant eher an, dass sich ihre Fahrperformanz im Vergleich zu früher leicht verschlechtert hat (EG: $MW = 2,56$; $SD = 1,11$ /KG: $MW = 3,00$; $SD = 0,93$; $U = 383,000$; $p = .048$, $d = 0,48$). Beide Gruppen schätzten ihr Fahrverhalten im Vergleich zu früher als etwas vorsichtiger ein, wobei die Senioren ein noch vorsichtigeres Fahrverhalten

tenangaben (EG: $MW = 1,76$; $SD = 0,65$ /KG: $MW = 2,42$; $SD = 0,77$; $U = 290,000$; $p = .001$, $d = 0,84$).

Schlafverhalten und aktuelle Müdigkeit:

Auf die Frage hin, wie viele Stunden der Schlaf der letzten Nacht betragen hat, gaben die Senioren der EG im Durchschnitt 7,62 Stunden an ($SD = 0,69$) und die Probanden der KG 7,11 Stunden ($SD = 0,05$). Dieser Unterschied ist sehr signifikant mit einer mittleren Effektstärke ($U = 339,500$; $p = .010$, $d = 0,64$). Auch sonst scheinen die Senioren eigenen Angaben zufolge im Durchschnitt signifikant länger zu schlafen als die Probanden der KG; während erstere durchschnittlich 7,70 Stunden schlafen ($SD = 0,72$), dauert der Schlaf der Probanden in der KG durchschnittlich 7,20 Stunden ($SD = 0,73$; $U = 333,000$; $p = .007$, $d = 0,67$). Bei der Interpretation des Unterschieds sollte die Berufstätigkeit der Probanden der KG berücksichtigt werden. Die Karolinska Sleepiness Scale zur Erfassung der aktuellen Müdigkeit wurde vor und nach den Simulatorfahrten eingesetzt. Das Ergebnis ist im Kapitel 6.3.1 dargestellt.

Akute gesundheitliche Probleme:

7 von 35 Senioren (20,6 %) leiden akut unter gesundheitlichen Problemen, bei der Kontrollgruppe sind es 5 von 31 Probanden (16,1 %). Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($\chi^2(1) = .214$, $p = .643$; $V = .057$).

Einnahme von Substanzen:

Mehr Senioren als Probanden der KG gaben an, in den letzten 48 Stunden ein Medikament zu sich genommen zu haben (EG: $n = 21$; 60,0 %/KG: $n = 11$; 35,5 %; $\chi^2(1) = 3,956$, $p = .047$; $V = .245$). Häufig genannte Medikamente waren gegen Bluthochdruck ($n = 9$), Schilddrüsenunterfunktion ($n = 5$) sowie zur Blutverdünnung ($n = 4$). Gerade ersteres kann mit Nebenwirkungen wie Müdigkeit einhergehen. Auf die Frage nach Alkoholkonsum in den letzten 48 Stunden stimmten signifikant mehr Probanden der EG ($n = 21$; 60,0 %) als der KG ($n = 9$; 29,0 %) zu ($\chi^2(1) = 6,359$, $p = .012$; $V = .310$). Am häufigsten wurde Bier ($n = 17$) konsumiert, gefolgt von Wein ($n = 11$) und sonstigen alkoholischen Getränken ($n = 4$), wobei manche Probanden auch verschiedene alkoholische Getränke zu sich genommen hatten. Kein Proband beider Gruppen hat in den letzten 48 Stunden sonstige Drogen zu sich genommen. Zudem haben alle Probanden verneint, Zweifel an ihrer Fahrtüchtigkeit zu haben, was ein Ausschlusskriterium zur Teilnahme am Fahrversuch gewesen wäre.

Simulatorkrankheit (Simulator Sickness): Die Ergebnisse zu Symptomen der Simulatorkrankheit, die mehrfach im Verlauf (pre/intra/post) erhoben wurden, werden im Kapitel 6.3.1 berichtet.

6.2 Drop-outs versus Completer

Nicht alle Probanden sind alle drei Übungsstrecken und die Teststrecke komplett gefahren. Grundsätzlich wurde den Probanden vor Beginn der Simulatorfahrten ausdrücklich mitgeteilt, dass sie jederzeit – auch ohne Angaben von Gründen – aber vor allem, wenn sie sich nicht wohl fühlen sollten (z. B. aufgrund von Simulatorkrankheit, Überanstrengung etc.), den Versuch sofort abbrechen könnten bzw. sollten. Auch der Versuchsleiter war dazu berechtigt, den Versuch aus Sicherheitsgründen jederzeit zu beenden. Im Folgenden werden diejenigen Probanden, die alle drei Übungsstrecken und die Teststrecke komplett gefahren sind, als Completer bezeichnet, wohingegen die Probanden, die vorzeitig die Versuchsreihe abgebrochen haben, als Drop-outs bezeichnet werden.

Bild 23 veranschaulicht, dass sich die Drop-out-Rate zwischen den beiden Untersuchungsgruppen sehr signifikant unterscheidet ($\chi^2(1) = 15,746, p < .001, V = .488$): Während in der KG nur 2 Probanden (6,5 %) den Versuch vorzeitig abgebrochen haben, waren es in der EG mehr als die Hälfte der Probanden ($n = 18; 51,4\%$). Unter den Drop-outs der EG entspricht der Anteil der Frauen ($n = 7; 38,9\%$) in etwa dem Frauenanteil der gesamten EG ($n = 12; 34,3\%$). Die beiden Drop-outs in der KG sind weiblichen Geschlechts. Innerhalb der EG zeigt sich (Bild 24), dass ältere Senioren mit einem Alter von 75 Jahren und älter tendenziell häufiger abgebrochen haben ($n = 8; 72,7\%$) als jüngere Senioren mit einem Alter von 65 bis 74 Jahren ($n = 10; 41,7\%$; $\chi^2(1) = 2,913, p = .089, V = .289$).

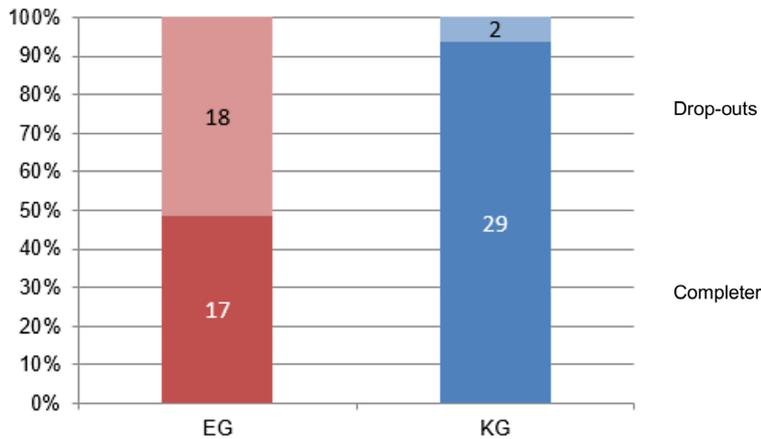


Bild 23: Drop-out-Rate – EG vs. KG

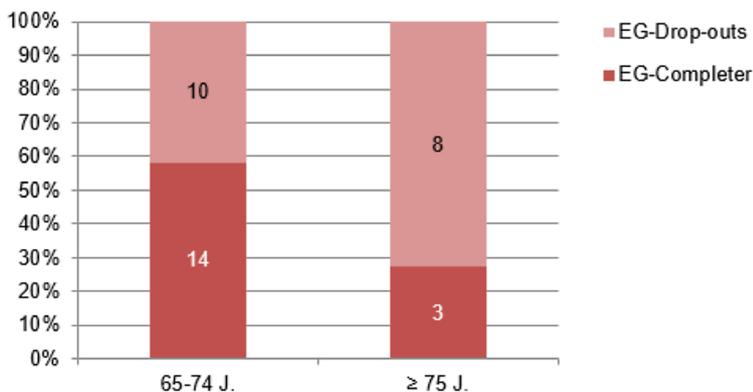


Bild 24: Drop-out-Rate – Jüngere vs. ältere Senioren

Die Probanden haben zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgebrochen (Bild 25): Während die beiden Drop-outs der KG erst bei der letzten Fahrt – der Testfahrt – abgebrochen haben, haben 13 von 18 Drop-outs (=72,2 %) aus der EG bereits bei den Übungsfahrten vorzeitig abgebrochen. Die Hälfte der Drop-outs ab 65 Jahre hat sogar direkt bei der ersten Übungsfahrt die Versuchsreihe vorzeitig beendet.

Probanden, die erst bei der Testfahrt abgebrochen haben, haben alle aufgrund von Simulatorkrankheitssymptomen die Studie vorzeitig beendet. Zum Teil sind diese Symptome sehr plötzlich und unerwartet - sowie bei zwei Probanden auch sehr heftig – aufgetreten. Fand der Abbruch dagegen relativ früh im Versuchsablauf statt, dann gaben die Probanden vermehrt an, dass sie mit dem Handling des Fahrradsimulators – insbesondere der Lenkung – nicht zurechtgekommen sind. Diesen älteren Probanden gelang es nicht, auf einer geraden Strecke die Spur zu halten, so dass sie oft mehrfach hintereinander unwillentlich von der Fahrbahn abgekommen sind.

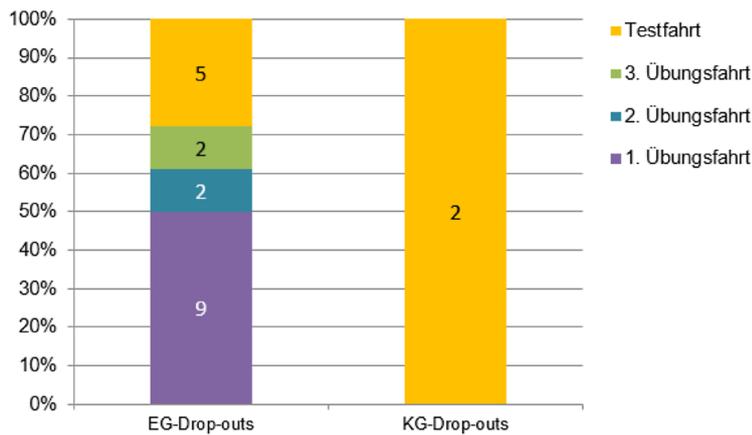


Bild 25: Drop-outs – Zeitpunkt des Abbruchs

Zum Vergleich der Completer und der Drop-outs innerhalb der EG wurde überprüft, ob sich diese hinsichtlich Simulatorerfahrung, Gesundheit und ihrem Wohlbefinden – ihren Angaben im Vorher-Fragebogen – unterscheiden. Die Ergebnisse werden in den beiden folgenden Kapiteln berichtet.

6.2.1 Drop-out-Rate in Abhängigkeit der Simulator-Vorerfahrung

Für die Interpretation der Ergebnisse sei nochmal darauf hingewiesen (s. Kapitel 6.1.1), dass der Anteil von Probanden mit Vorerfahrungen am Pkw-Fahrsimulator der BAST in der KG ($n = 18, 58,1\%$) signifikant größer ist als in der EG ($n = 8; 22,9\%$). Stellt man nun innerhalb der Seniorengruppe die Simulatorerfahrung der Drop-out-Rate gegenüber (Bild 26), dann fällt auf, dass die Drop-out-Rate bei den Senioren ohne vorherige Erfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator der BAST größer ist (16 von 27 Senioren; $59,3\%$) als bei den Senioren mit Simulatorerfahrung (2 von 8 Senioren; $25,0\%$). Der Unterschied ist auf Basis der kleinen Stichprobe dem χ^2 -Test zufolge allerdings nur marginal signifikant ($\chi^2(1) = 2,900, p = .089, V = .288$). Dennoch mussten 2 von 8 Probanden der EG, die in einem vorausgehenden Projekt das aufwändige Training und die Testfahrt im Pkw-Fahrsimulator erfolgreich abgeschlossen hatten, die Studie mit dem Fahrradsimulator vorzeitig beenden.

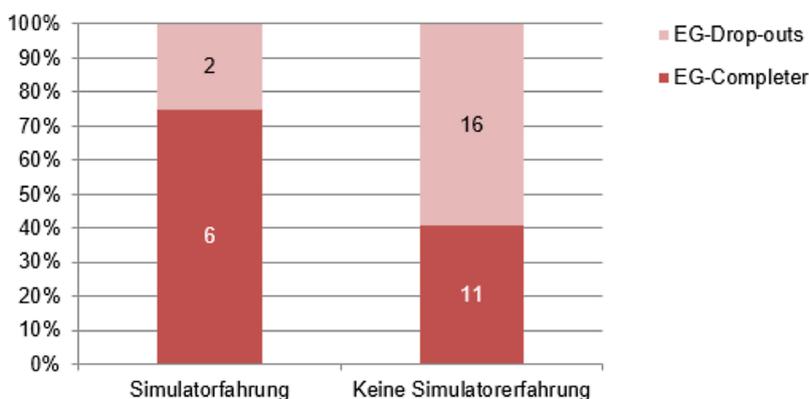


Bild 26: Drop-Out-Rate in Abhängigkeit der Vorerfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator

Betrachtet man nun umgekehrt den Anteil der Probanden mit Simulatorerfahrung in den beiden Completer-Gruppen (Bild 27), dann zeigt sich, dass dieser in der Teilgruppe der EG-Completer (6 von 17 Completern = 35,3 %) höher ist als in der Gesamtgruppe der Probanden im Seniorenalter (22,9 %; s. Kapitel 6.1.1), aber immer noch niedriger ist als in der Teilgruppe der KG-Completer (17 von 29 Completern = 58,6 %; Bild 27). Der Unterschied zwischen den beiden Completer-Gruppen erweist sich bei diesen kleinen Stichproben als nicht signifikant ($\chi^2(1) = 2,333, p = .127, V = .225$).

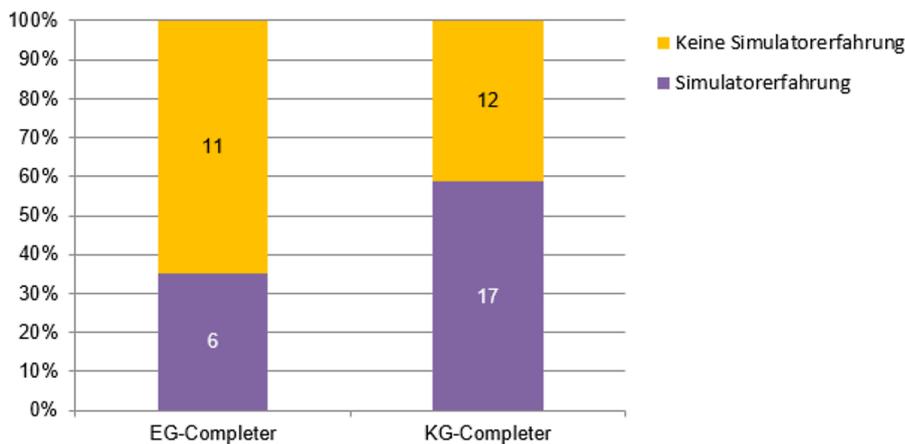


Bild 27: Anteil der Probanden mit und ohne Simulatorerfahrung in den beiden Completer-Gruppen

Inwiefern die Simulatorerfahrung mit dem Pkw-Fahrsimulator einen Einfluss auf die Drop-out-Rate sowie die Fahrperformanz der Probanden mit dem Fahrradsimulator gehabt haben könnte, wird in den Kapitel 7.1 und 7.2 ausführlich diskutiert.

Zum Schluss noch eine Anmerkung zu den beiden Drop-outs der KG: Innerhalb der Kontrollgruppe hatte einer der beiden Drop-outs ebenfalls keine Simulatorerfahrung. Die andere Probandin hatte zwar bereits Erfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator sammeln können, aber auch schon damals zum Ende der sehr langen Testfahrt mit dem Pkw-Fahrsimulator leichte Symptome der Simulatorekrankheit entwickelt.

6.2.2 Drop-out-Rate in Abhängigkeit von Gesundheit und Wohlbefinden

Differenziert man die EG nach Angaben zu Gesundheit und Wohlbefinden aus dem Vorher-Fragebogen, dann zeigt sich bei der Frage nach Reiseübelkeitsbeschwerden, dass die Drop-outs in der EG zwar tendenziell mehr (geringe) Beschwerden angaben (55,6 % der Abbrecher gaben an, unter ‚sehr wenigen oder wenigen Reiseübelkeitsbeschwerden zu leiden; bei den Completern sind dies nur 23,5 %); dem χ^2 -Test zufolge erweist sich dieser Unterschied in dieser kleinen Stichprobe als nicht signifikant $\chi^2(5) = 6,501, p = .261, V = .431$). Zudem nannten die Senioren, die vorzeitig abgebrochen haben, nicht mehr gesundheitsbedingte Beeinträchtigungen des Fahrverhaltens, als die, die alle vier Simulatorfahrten komplett gefahren sind.

Die Drop-outs unter den Senioren schätzten im Vorher-Fragebogen ihre (Real-)Fahrperformanz (Drop-outs: $MW = 2,94; SD = 1,09$; Completer: $MW = 2,18; SD = 1,02; t(32) = -2,119, p = .42, d = -0,72$) und ihr Fahrverhalten (Drop-outs: $MW = 2,06; SD = 0,66$; Completer: $MW = 1,47; SD = 0,51; t(32) = -2,902; p = 0,07, d = -1,00$) im Vergleich zum Alter mit 20 Jahren besser ein als die Completer unter den Senioren.

6.3 Ergebnisse der vier Simulatorfahrten im Verlauf

Für 16 Completer der EG und für 28 Completer der KG liegen vollständige Datensätze zu allen vier Erhebungszeiten vor, die im Folgenden miteinander verglichen werden. Um auch das Erleben und Verhalten der Senioren, die den Versuch vorzeitig abgebrochen haben, näher zu beleuchten, werden zusätzlich die Ergebnisse der Drop-outs der EG in den Diagrammen mitabgebildet. Bei der inhaltlichen Beschreibung der Ergebnisse der EG-Drop-outs wird sich auf einen deskriptiven Vergleich zu den Completern beschränkt, da sich die Fallzahlen im Laufe der Versuchsreihe von $n = 11$ auf $n = 5$ reduzieren. Alle Drop-outs haben nach der vorzeitig beendeten Fahrt noch die dazugehörigen Fragebögen ausgefüllt. Die zwei Drop-outs der KG werden bei den folgenden Auswertungen aufgrund der kleinen Probandenanzahl nicht berücksichtigt.

6.3.1 Simulatorkrankheit (Selbst- und Fremdurteil)

Mögliche Symptome der Simulatorkrankheit wurden sowohl aus Probandensicht als auch anhand eines Items durch die Versuchsleiter gemäß Ihren Beobachtungen dokumentiert. Zur expliziten Erfassung des aktuellen Ausmaßes von Müdigkeit haben sich die Probanden zudem auf der Karolinska Sleepiness Scale eingeschätzt.

Karolinska SleepinessScale (Müdigkeit im Selbsturteil)

Auf der Karolinska Sleepiness Scale, bei der die Probanden ihre Müdigkeit von 1 = „extrem wach“ bis 9 = „sehr müde“ vor den vier Simulatorfahrten (pre) sowie nach der Testfahrt (post) einstufen konnten, fallen alle Durchschnittswerte in den Bereich zwischen 3 (= wach) und 4 (= eher wach). Es zeigen sich weder signifikante Differenzen zwischen den EG- und den KG-Completern, noch zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten ($p > .05$). Auch der Interaktionseffekt ist nicht signifikant. Zudem liegen die Müdigkeitswerte der EG-Drop-outs nah bei denen der beiden Completer-Gruppen.

Simulator Sickness-Questionnaire (Selbsturteil)

Kurz vor der ersten Übungsfahrt (pre), nach der zweiten Übungsfahrt (inter) und direkt nach der Testfahrt (post) haben die Probanden mittels des Simulator Sickness-Questionnaires angegeben, ob sie einzelne oder mehrere Symptome der Simulatorkrankheit bei sich wahrgenommen haben. Die 15 Items des Simulator Sickness-Questionnaires werden den drei Faktoren Übelkeit, Okulomotorik und Desorientierung zugeordnet, deren Ergebnisse in Bild 28 bis Bild 30 dargestellt sind. Es zeigen sich zwischen den EG- und KG-Completern zu allen drei Erhebungszeitpunkten keine signifikanten Unterschiede. Der Hauptfaktor Erhebungszeitpunkt erweist sich dagegen bei allen drei Faktoren als signifikant ($p < .05$). Deskriptiv lässt sich feststellen, dass die EG-Drop-outs bei Items der Faktoren ‚Übelkeit‘ und ‚Okulomotorik‘ zum letzten Erhebungszeitpunkt höhere Werte angeben als die EG-Completer. Auf Einzelitemebene sind den Angaben der EG-Drop-outs zufolge insbesondere zum Faktor I ‚Übelkeit‘ die Symptome ‚Allg. Unwohlsein‘, ‚Übelkeit‘, ‚Magengefühl unangenehm‘, ‚Schwitzen‘ und ‚Aufstoßen‘ sowie zum Faktor II ‚Okulomotorik‘ die Symptome ‚Erschöpfung‘, ‚Überreizung‘, ‚Kopfschmerzen‘ und ‚Konzentrationsstörungen‘ stark ausgeprägt, die im Verlaufe der drei Erhebungszeitpunkte deutlich zunahmten (Bild 31).

Bei allen Ergebnissen muss berücksichtigt werden, dass zum letzten Erhebungszeitpunkt nur noch 5 Probanden der EG-Drop-outs den Simulator Sickness-Questionnaire ausgefüllt haben.

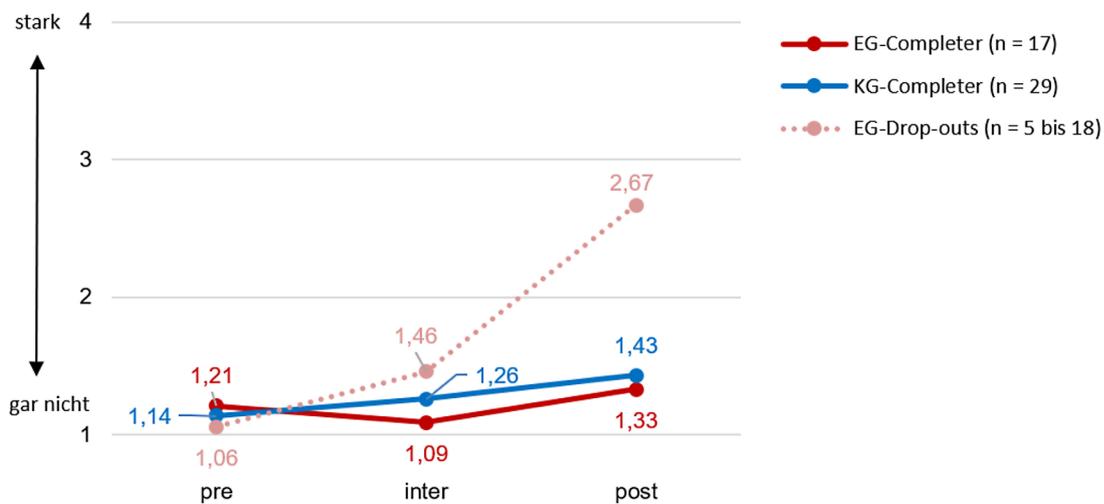


Bild 28: Simulatorkrankheit – Faktor I Übelkeit in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)

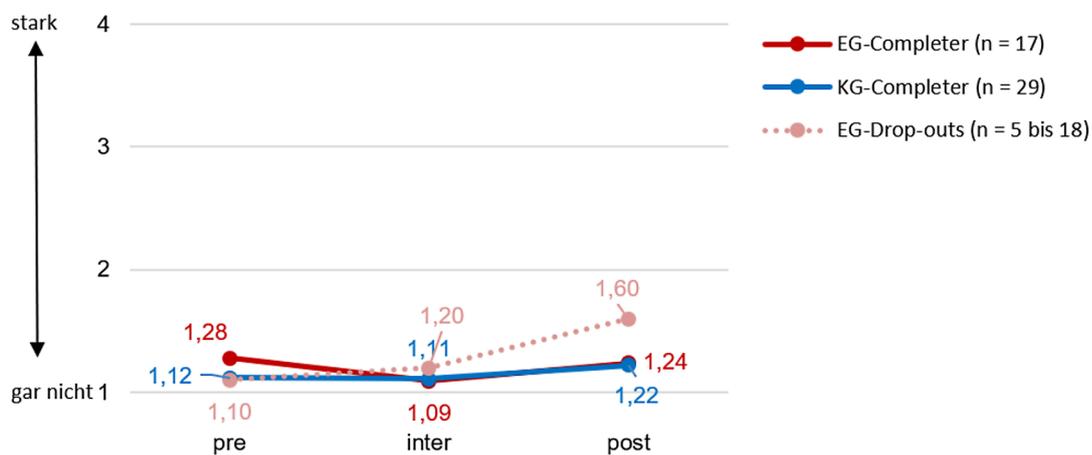


Bild 29: Simulatorkrankheit – Faktor II Okulomotorik in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)

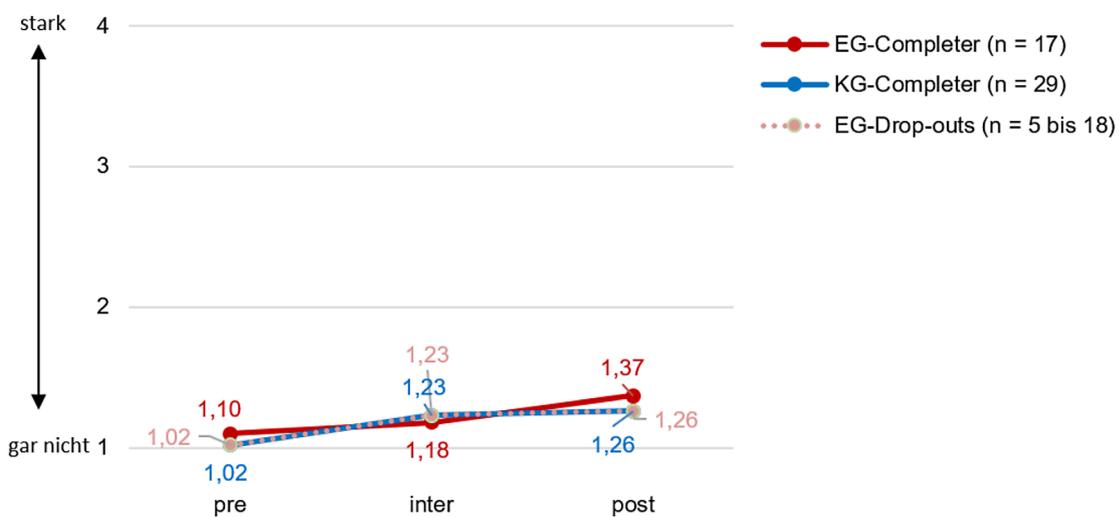


Bild 30: Simulatorkrankheit – Faktor III Desorientierung in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)

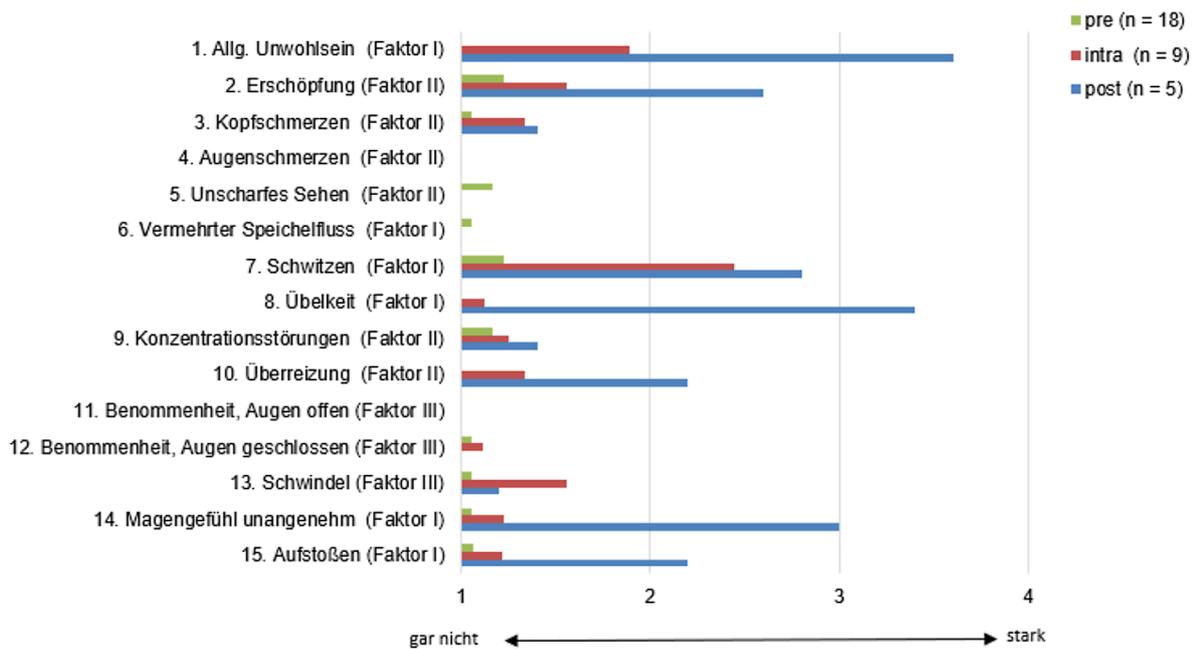


Bild 31: Simulatorkrankheit – Symptome auf Itemebene der EG-Drop-outs in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)

Simulatorkrankheit (Fremdurteil)

Die Versuchsleiter haben nach jeder der vier Simulatorfahrten auf einer groben Skala von 0–15 angegeben, inwiefern sie Anzeichen von Unverträglichkeit – wie z. B. Schwanken, Aufstoßen bis hin zu Übergeben bzw. verbale Äußerungen zum Unwohlsein bei den Probanden – feststellen konnten.

Wie in Bild 32 dargestellt, liegen die Werte der beiden Completer-Gruppen – mit Ausnahme des vierten Erhebungszeitpunktes (nach der Testfahrt) – auf niedrigem Niveau nah beieinander. Entsprechend ist der Haupteffekt „Gruppe“ nur marginal signifikant: $F(1, 3.916) = 3.91, p = .055, \eta^2_{\text{part}} = .087$. Sowohl der Haupteffekt „Erhebungszeitpunkt“ ($F(3, 74.283) = 7.34, p = .002, \eta^2_{\text{part}} = .152$) als auch der Interaktionseffekt „Erhebungszeitpunkt x Gruppe“ ($F(3, 74.283) = 3.22, p = .050, \eta^2_{\text{part}} = .073$) erweisen sich dagegen als signifikant. So zeigt sich in Bild 32, dass sich bei den EG-Completern zum vierten Erhebungszeitpunkt ein deutlicher Anstieg der beobachteten Unverträglichkeit abbildet, während

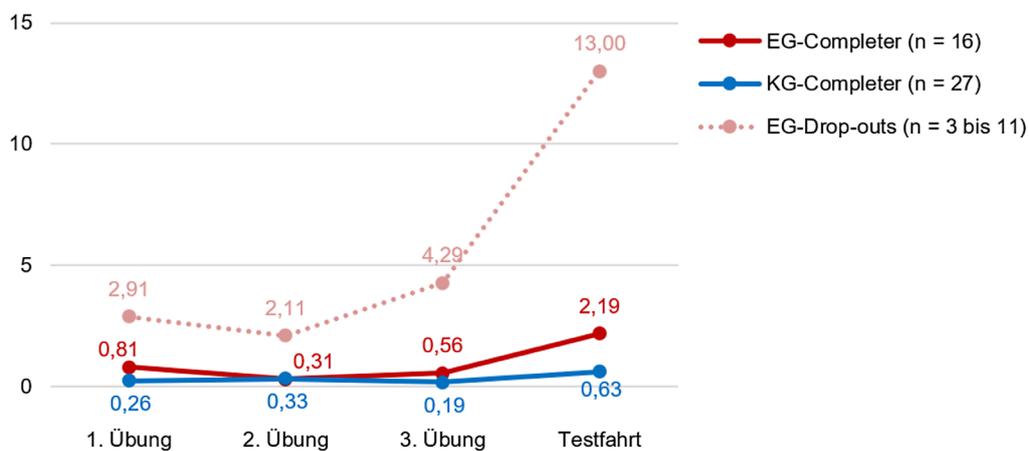


Bild 32: Anzeichen von Unverträglichkeit (Fremdurteil)

sich bei den KG-Completern über die vier Erhebungszeitpunkte kaum eine Veränderung feststellen lässt.

Losgelöst davon lässt sich bei den EG-Drop-outs rein deskriptiv ein starker Anstieg der beobachteten Unverträglichkeit von der 2. zur 3. Übungsfahrt und dann vor allem zur Testfahrt hin feststellen. Hierbei müssen jedoch die geringen, abnehmenden Fallzahlen in der Gruppe der EG-Drop-outs berücksichtigt werden (2. Übungsfahrt: $n = 9$; 3. Übungsfahrt: $n = 7$; Testfahrt: $n = 3$).

6.3.2 Einschätzung der Fahrperformanz im Fahrradsimulator (Fremdurteil)

Nach jeder der vier Simulatorfahrten haben die Versuchsleiter auf einer Skala von 1 bis 15 eingeschätzt, wie gut der Proband ihrer Einschätzung nach mit dem Fahrradsimulator gefahren ist und dies im Feld „Anmerkungen“ kommentiert. Wie in Bild 33 dargestellt, wurde die Fahrperformanz der KG-Completer signifikant besser eingeschätzt als die der EG-Completer. Dementsprechend erweist sich der Haupteffekt „Gruppe“ als signifikant ($F(1, 36) = 18.30, p < .001, \eta^2_{\text{part}} = .337$), was auf Unterschiede zum ersten und dritten Erhebungszeitpunkt zurückzuführen ist. Ebenfalls ist der Hauptfaktor „Erhebungszeitpunkt“ ($F(3, 108) = 8.17, p < .001, \eta^2_{\text{part}} = .185$), und der Interaktionseffekt „Erhebungszeitpunkt x Gruppe“ ($F(3, 108) = 8.17, p = .030, \eta^2_{\text{part}} = .079$) signifikant. In der Gruppe der EG-Completer zeigt sich mit jeder Simulatorfahrt eine (leichte) Zunahme der beobachteten Fahrperformanz.

Die Probanden der EG-Drop-outs werden in ihrer Fahrperformanz am negativsten bewertet. Hierbei erweist sich der größte Unterschied zu den EG-Completern bei der 1. Übungsfahrt und der geringste bei der 2. Übungsfahrt (Fahrradparcours).

Zur Interpretation der Ergebnisse sei schon an dieser Stelle angemerkt, dass Unterschiede in der Fahrperformanz mit dem Fahrradsimulator aufgrund bisher fehlender Validitätsnachweise nicht auf die Fahrperformanz mit einem Realfahrrad schließen lassen. Auf die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen wie z. B. deskriptiv mehr Probanden mit Simulatorvorerfahrungen in der KG im Vergleich zur EG wurde bereits im Kapitel 6.2.1 eingegangen. Die hier dargestellten Ergebnisse werden vor diesem Hintergrund im Kapitel 7 ausführlich diskutiert.

Unter den freien Anmerkungen der Versuchsleiter kristallisieren sich für die drei Übungsfahrten folgende Schwerpunktthemen heraus (Ergebnisse zur Testfahrt: s. Kapitel 6.4):

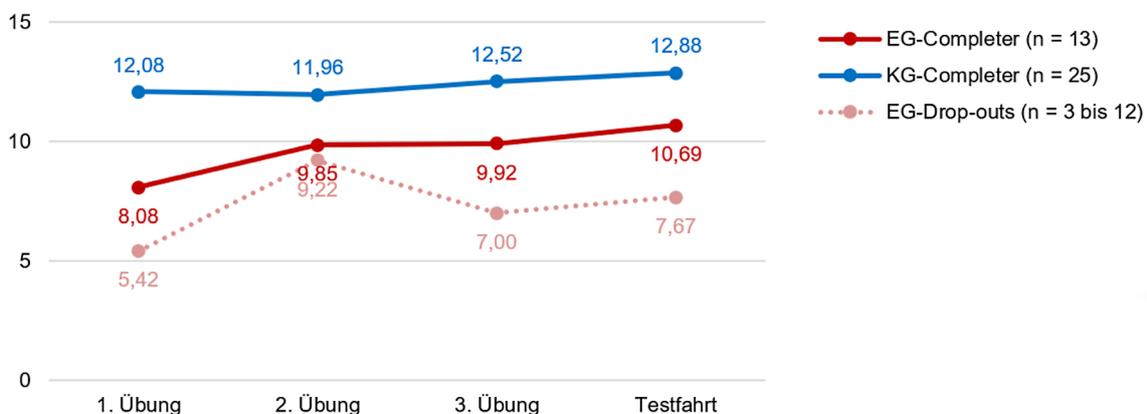


Bild 33: Einschätzung der Fahrperformanz (Fremdurteil)

	EG-Completer	KG-Completer
1. Übung (Landstrecke)	<ul style="list-style-type: none"> • Probleme mit der Spurhaltung (starkes Schwanken, mittiges Fahren auf dem Fahrstreifen) • sehr langsames Fahren • schiefes Sitzen auf dem Fahrradsattel • starke Irritationen durch Gegenverkehr (große landwirtschaftliche Fahrzeuge) • Probleme mit der Gangschaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • mittiges Fahren auf dem Fahrstreifen • sehr hohe Geschwindigkeiten • zu spätes Bremsen bei kritischen Ereignissen • starke Lenkausschläge (die sich weiter aufschaukeln)
2. Übung (Parcours)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Spurhaltung, leichte Schwankungen bei eng markierter Fahrspur → Kompensation durch Leerlauf • Irritiert, dass eigenes Vorderrad auf Fahrbahn nicht virtuell abgebildet ist • sehr langsames Fahren • linksschiefes Sitzen • zittrige Arme • zu frühes Bremsen 	<ul style="list-style-type: none"> • insgesamt gute Spurhaltung, nur leichtes Korrigieren/Schwanken bei eng markierter Fahrspur (insbes. in der Kurve, z. T. hier langsames Fahren) • Bremsen überwiegend gut, vereinzelt zu stark oder zu früh gebremst
3. Übung (Stadtstrecke)	<ul style="list-style-type: none"> • z. T. Unsicherheiten beim Abbiegen (v. a. mit Handzeichen), großer Lenkradius • mittiges Fahren auf dem Fahrstreifen • z. T. Abkommen vom Fahrstreifen • sehr langsames Fahren • zu schnelles Losfahren nach Bremsen vor Stoppschild • zittrige Arme 	<ul style="list-style-type: none"> • überwiegend sicheres Fahren • z. T. zu schnelles Fahren in die Kurve → Unsicherheiten und vereinzelt von der Spur abgekommen • vereinzelt wird mittig auf dem Fahrstreifen gefahren

Tab. 5: Schwerpunktthemen der drei Übungsfahrten

Bei den EG-Drop-outs wurden ähnliche Auffälligkeiten notiert wie bei den EG-Completern, nur im stärkeren Ausmaß. So kam es bei der ersten Übungsfahrt häufiger zum Spurverlassen und bei der dritten Übungsfahrt häufiger zu Kollisionen.

Ebenfalls haben die Versuchsleiter nach jeder Simulatorfahrt angegeben, inwiefern sich die Strecke zum grundsätzlichen Eingewöhnen (1. Übungsstrecke), zum Trainieren der Fahrgeschicklichkeit (2. Übungsstrecke), zum Gewöhnen an das Stadtszenario (3. Übungsstrecke) bzw. zum Untersuchen von Fahrverhalten bei kritischen Verkehrsszenen (Teststrecke) bei jedem Probanden bewährt hat. Die angegebenen Durchschnittswerte sind in Bild 34 visualisiert. Zur Signifikanztestung wird eine ANOVA mit Messwiederholung gerechnet, bei der sich der Haupteffekt Gruppe als signifikant erweist ($F(3, 40) = 5.07, p = .030, \eta^2_{\text{part}} = .112$). Dies ist dadurch bedingt, dass sich die erste Eingewöhnungsstrecke für die KG-Completer signifikant mehr bewährt hat als für die EG-Completer. Letztere haben sich – gemäß den Anmerkungen der Versuchsleiter – auf der ersten Übungsstrecke häufig vom Gegenverkehr (in Form von großen landwirtschaftlichen Fahrzeugen) zu stark irritieren lassen, so dass sie sich auf das eigentliche Fahren kaum konzentrieren konnten. Auch hat sich der breite Fahrstreifen einer Landstraße bei der ersten Übungsstrecke nicht bewährt, da sie offensichtlich zu wenig Orientierung zum Spurhalten gegeben hatte. Demgegenüber kamen insbesondere die älteren Probanden mit der speziellen Spurhaltungsübung im Fahrradparcours (2. Übung), bei der die einzuhaltende Fahrspur extra in Rot bzw. Gelb eingefärbt ist, deutlich besser zurecht.

Die eigentliche Teststrecke hat sich bei den EG-Completern aus Sicht der Versuchsleiter weniger bewährt, da einige Senioren einen Teil der eingearbeiteten kritischen Verkehrsszenen aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit nicht als kritisch wahrnehmen konnten.

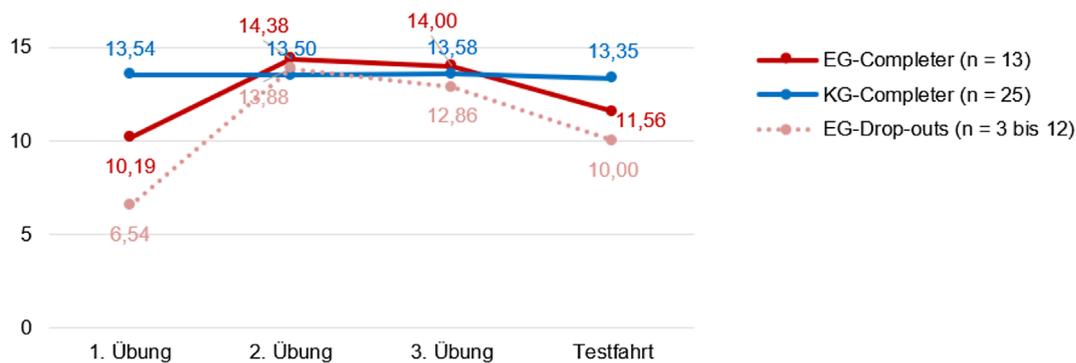


Bild 34: Bewährung der Übungs- und Teststrecken (Fremdurteil)

6.3.3 Fahrerleben mit dem Fahrradsimulator (Selbsturteil)

Die Probanden haben nach jeder der vier Simulatorfahrten (1. Übung „Landstrecke“, 2. Übung „Fahrradparcours“, 3. Übung „Kurze Stadtstrecke“ und 4. „Testfahrt“) einen kurzen Fragebogen mit 5 bis 8 Items beantwortet. Allen Fragen zum subjektiven Fahrerleben ist eine Antwortskala von 0–15 hinterlegt, wobei höhere Werte für höhere Ausprägungen stehen. Die im Folgenden angegebenen statistischen Ergebnisse beziehen sich nur auf den Vergleich der EG- mit den KG-Completern.

Zur Abfrage eines allerersten Stimmungsbildes nach den Fahrten wurden die Probanden befragt, wie viel Spaß Ihnen die Fahrt gemacht hatte (Skala: 0 = „keinen Spaß“ bis 15 = „sehr viel Spaß“). Es zeigt sich, dass die Bewertungen von den EG-Completern (durchschnittlicher *MW* über die vier Fahrten = 10,45) und den KG-Completern (durchschnittlicher *MW* über die vier Fahrten = 10,69) bei allen vier Fahrten nah beieinander liegen (Mittlere Differenz: $-.234$, $p = .741$). Der Haupteffekt „Erhebungszeitpunkt“ fällt dagegen signifikant aus: ($F(3, 126) = 9.22$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{part}} = .180$). Im Post-Hoc-Test zeigt sich, dass die Probanden nach der ersten Übungsfahrt signifikant weniger Spaß erlebten als nach der dritten Übungsfahrt sowie der Testfahrt zum Schluss.

Die Drop-outs der EG erlebten erwartungsgemäß den geringsten Spaß bei den vier Simulatorfahrten, wobei die erste Übungsfahrt (*MW* = 7,09; *SD* = 4,68) am negativsten bewertet wurde. Wie im Kapitel 6.2 berichtet, haben 9 Senioren nach der ersten Übungsfahrt die Studie abgebrochen, so dass das Ergebnis nicht überraschend ist.

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei den Fragen zum „Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator“, zur „körperlichen Anstrengung“, zur „kognitiven Anstrengung (Orientierung im virtuellen Raum)“ und zum „Meistern der Fahraufgaben bzw. Herausforderungen des Stadtverkehrs“ (Bild 35 bis Bild 38). So erweist sich der Haupteffekt „Erhebungszeitpunkt“ bei allen vier Items als signifikant ($p < .001$ bis $p = .014$). In der Regel wurden die höchsten Werte nach der Testfahrt vergeben mit Ausnahme der kognitiven Anstrengung, sich im virtuellen Raum zu orientieren bzw. den Verkehr zu beobachten; hier wurde die erste Übungsfahrt von den EG-Completern als am anstrengendsten erlebt.

Der Haupteffekt „Gruppe“ (EG- vs. KG-Completer) ist nur bei der angegebenen körperlichen Anstrengung signifikant ($F(1, 42) = 7.08$, $p = .011$, $\eta^2_{\text{part}} = .144$), wobei die Probanden der KG-Completer – insbesondere nach der Testfahrt – höhere Anstrengungswerte angaben als die EG-Completer. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Probanden bei allen vier Fahrten ihre bevorzugte Geschwindigkeit frei wählen konnten und die Probanden der KG-Completer im Durchschnitt signifikant schneller gefahren sind als die EG-Completer (s. Kapitel 6.4.1).

Deskriptive Diskrepanzen zwischen den EG-Completern und den EG-Drop-outs zeigen sich vor allem bei den Items „mit dem Fahrradsimulator zurechtkommen“ und „Herausforderungen der Fahraufgaben bzw. des Stadtverkehrs lösen“. Hier schätzten die EG-Drop-outs ihre Kompetenzen niedriger ein als die EG-Completer – mit Ausnahme der 2. Übung (Fahrradparcours).

Weiterhin wurden die Probanden nach der zweiten und dritten Übungsfahrt gefragt, wie gut sich ihrer Meinung nach die Strecke zum Üben mit dem Fahrradsimulator erwiesen hat. Hier lässt sich weder ein signifikanter Erhebungszeitpunkt- noch ein Gruppeneffekt nachweisen. Dies trifft auch auf die Schlussfrage zu, bei der die Probanden angeben sollten, wie gerne sie jetzt weiterfahren bzw. in Zukunft noch einmal mit dem Fahrradsimulator fahren möchten. Hierbei fällt lediglich auf, dass die EG-Drop-outs diese Frage erwartungsgemäß deutlich negativer beantworteten; insbesondere nach der Testfahrt (EG-Drop-outs: $n = 5$, $MW = 6,40$; $SD = 6,50$ /EG-Completer: $n = 16$, $MW = 11,50$; $SD = 2,66$).

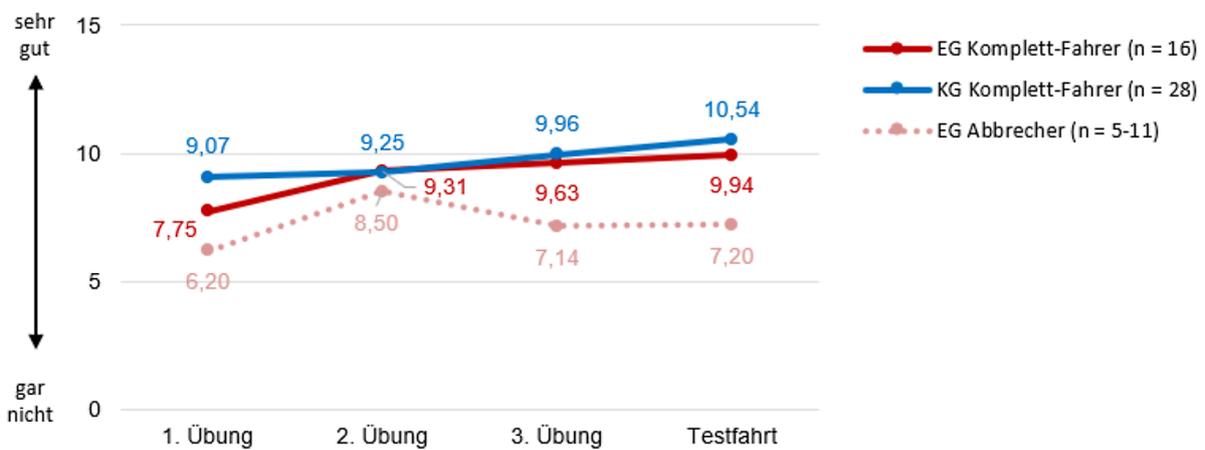


Bild 35: Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator (Selbsturteil)

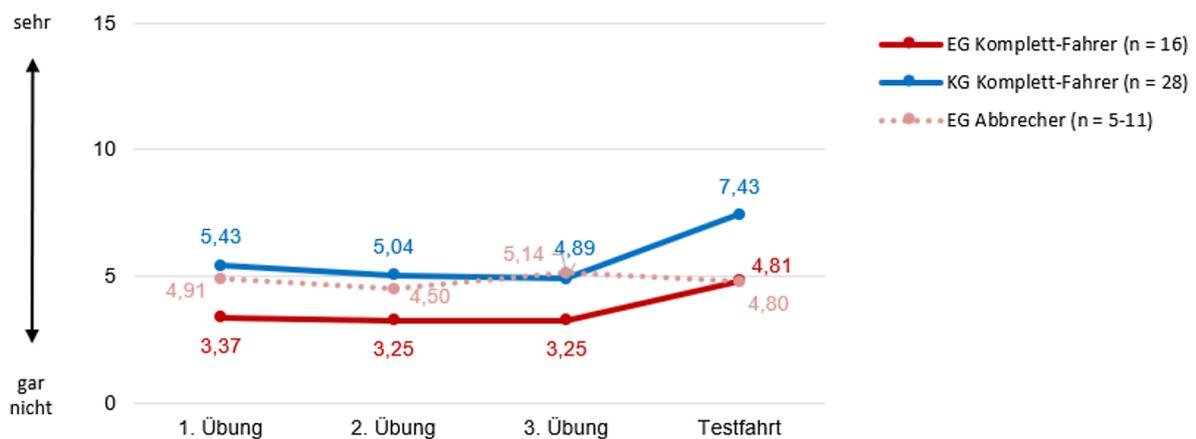


Bild 36: Erlebte körperliche Anstrengung (Selbsturteil)

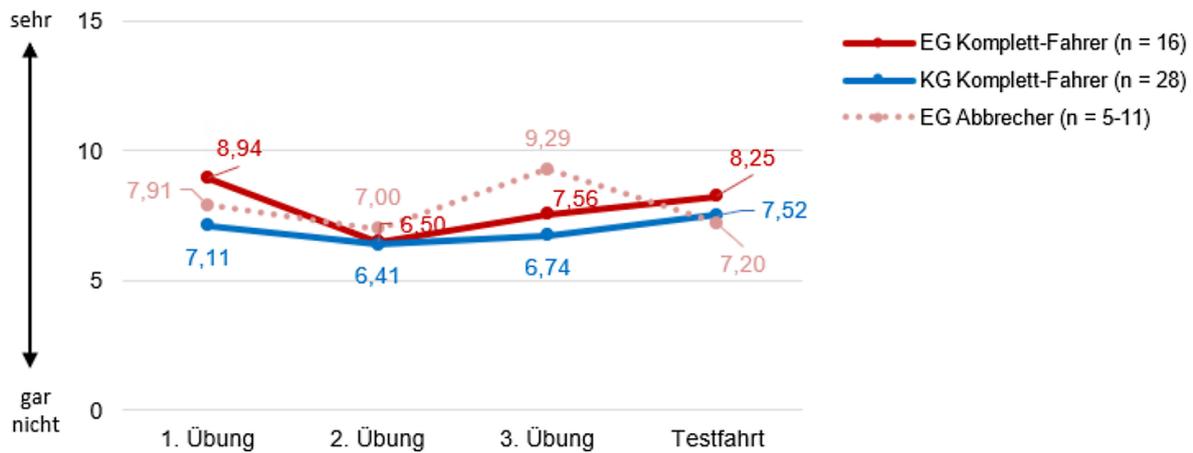


Bild 37: Erlebte kognitive Anstrengung (Selbsturteil)

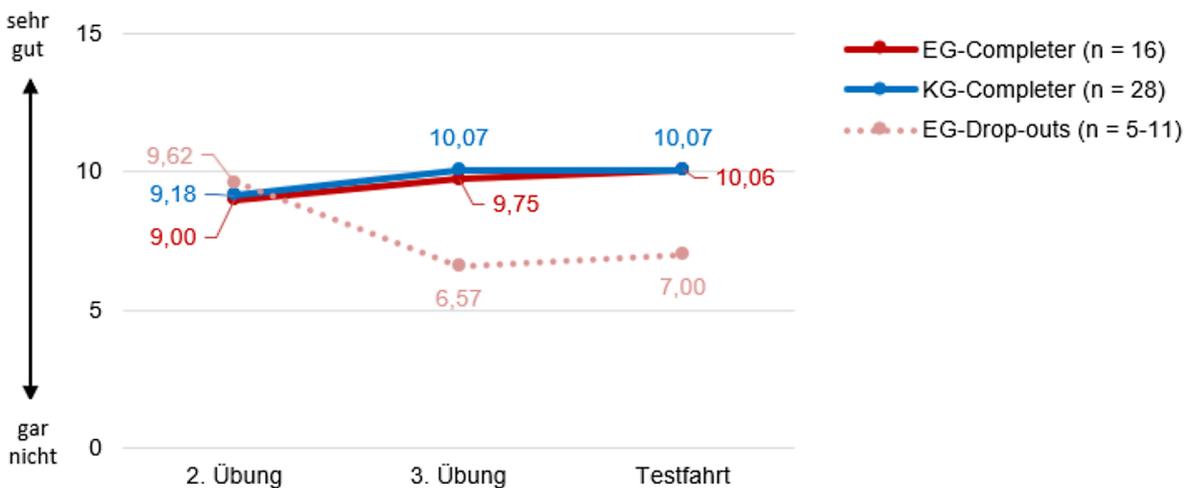


Bild 38: Fahraufgaben bzw. Herausforderungen im Stadtverkehr meistern (Selbsturteil)

6.4 Ergebnisse der Testfahrt

Während die ersten drei Simulatorfahrten der Eingewöhnung an den Fahrradsimulator dienten, sollte mittels der anschließenden ca. 7-15-minütigen Testfahrt die Fahrperformanz und das Fahrerleben der Probanden der EG und KG – u. a. in Bezug auf kritische Situationen – tiefergehend untersucht werden. Bei den statistischen Auswertungen wurde sich auf einen Vergleich der beiden Completer-Gruppen beschränkt.

Zunächst werden die Ergebnisse der durch den Fahrradsimulator und der Simulator-Software automatisch erfassten Geschwindigkeit dargestellt. Darauf folgt eine Erläuterung von der vom Versuchsleiter beobachteten Fahrfehler und -unsicherheiten. Zum Schluss wird das Fahrerleben aus Sicht der Probanden berichtet.

6.4.1 Geschwindigkeitsvergleich (SILAB-Daten)

In Bezug auf die Geschwindigkeit werden zum einem die Durchschnittsgeschwindigkeit als auch die Maximalgeschwindigkeit der gesamten Teststrecke betrachtet. Für die Auswertung konnten die Daten von 17 EG-Completern und 27 KG-Completern verwertet werden; bei zwei Probanden der KG-Completer lag aufgrund eines Aufnahmefehlers keine Datenaufzeichnung vor.

Die statistischen Analysen ergeben, dass die KG-Completer mit dem Fahrradsimulator im Durchschnitt 4,5 km/h schneller gefahren sind als die EG-Completer ($MW = 19,60$; $SD = 1,88$ versus $MW = 15,10$; $SD = 2,44$; $t(42) = -6,86$; $p < .001$, $d = -2,13$). Die gefahrene Maximalgeschwindigkeit erreicht bei den KG-Completern mit einem Gruppenmittelwert von 27,36 km/h ($SD = 3.26$) einen relativ hohen Wert, der zudem signifikant höher ist als der der EG-Completer ($MW = 21,40$; $SD = 3,65$; $t(42) = -5.50$, $p < .001$, $d = -1,75$). Acht Probanden der KG-Completer erreichten Maximalwerte über 30 km/h, was – wie auch im Kapitel 7 diskutiert – bei einer vergleichbaren Realfahrt in einem städtischen Szenario als eher unrealistisch einzuschätzen ist. Insofern sind auch die Durchschnittsgeschwindigkeiten nur mit Vorsicht zu interpretieren. Andererseits waren die beobachteten Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den beiden Completer-Gruppen so deutlich zu beobachten, dass sie an dieser Stelle trotz möglicher Validitätsprobleme berichtet werden sollen. Zudem wirkten sich die Geschwindigkeitsunterschiede – wie im folgenden Kapitel berichtet – auf das Erleben der kritischen Verkehrsszenen und damit auf die Fahrfehler aus.

6.4.2 Fahrfehler und -unsicherheiten (Fremdurteil)

Während der Fahrt wurde von den Versuchsleitern für jeden der 19 Streckenabschnitte (Kapitel 5.4.4 und Tabelle 5) dokumentiert, ob bei den Probanden folgende Fahrfehler beobachtet werden konnten: „Spur verlassen“, „Kollision“, „Vorfahrtsfehler“ bzw. „Lichtsignalanlage (LSA) missachtet“, „Falsch abgebogen“, „Handzeichen-Fehler (fehlt, verzögert, unklar)“ sowie „Andere Verkehrsteilnehmer nicht im Blick“. Der zuletzt genannte Fahrfehler wurde von den Versuchsleitern allerdings kein Mal dokumentiert, da sich diese Fehlerart ohne Videokameraaufnahme von vorne nur schwer beurteilen ließ.

Überblick: Streckenabschnitte der Teststrecke

- (1) Start auf Schutzstreifen
- (2) Wechsel zu baulich getrenntem Radweg
- (3) Wechsel auf die Fahrbahn zum Mischverkehr
- (4) Verkehrsarme (nur Gegenverkehr) gerade Strecke mit Mischverkehr (Füllstrecke)
- (5) Rechtsabbiegen auf Vorfahrtsstraße
- (6) Vorbeifahrt an Bushaltestelle (ohne weitere Verkehrsteilnehmer), plötzliches Queren eines Kindes, ein Pkw überholt, am Fußgängerüberweg quert ein minderjähriger Fußgänger (kritische bzw. unangenehme Verkehrsszene)
- (7) Rechtsabbiegen mit Vorfahrt achten
- (8) Linksabbiegen auf Vorfahrtsstraße
- (9) Linksabbiegen mit Vorfahrt achten
- (10) Wechsel auf baulich getrennten Radweg
- (11) Von rechts biegt eine Radfahrerin ein und fährt mit sehr geringer Fahrgeschwindigkeit vor dem Probanden her bei zugleich überholendem Pkw-Verkehr, ein Pkw überholt mit sehr geringem Abstand (unangenehme und beim Überholvorgang kritische Verkehrsszene)
- (12) Wechsel zu Schutzstreifen

- (13) Zwei aufeinanderfolgende Kreuzungen, ein Pkw überholt den Probanden mit geringem Abstand und biegt knapp hinter ihm rechts ab (unangenehme Verkehrsszene „schneiden“)
- (14) Kreisverkehr mit Vorfahrt achten
- (15) Halt zwischen zwei Pkw an einer Lichtsignalanlage bei Rot (unangenehme Verkehrsszene)
- (16) Wechsel zu Radweg
- (17) Gelber Lieferwagen kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt (kritische Verkehrsszene) der vorfahrtberechtigten Hauptstraße
- (18) Weißer Pkw kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt bei Missachtung der Vorfahrt der führenden Straße (kritische Verkehrsszene)
- (19) Ende auf Radweg

Aufgrund des deutlichen Unterschiedes in der Fahrgeschwindigkeit (KG-Completer > EG-Completer, s. vorheriges Kapitel) wurden die einzelnen Streckenabschnitte der Teststrecke von beiden Completer-Gruppen unterschiedlich kritisch erlebt. So fuhren viele EG-Completer für die Streckenabschnitte 6 (plötzliche Straßenüberquerung eines Kindes als Fußgänger), 11 (langsam vorausfahrende Radfahrerin bei zugleich überholendem Pkw) und 17 (Proband wird von einem gelben Lieferwagen die Vorfahrt genommen) zu langsam, als dass sie diese Streckenabschnitte hätten als kritisch wahrnehmen können. Umgekehrt waren viele KG-Completer für die kritische Verkehrsszene im Streckenabschnitt 18 (Proband wird die Vorfahrt von einem weißen Pkw genommen) zu schnell. In der Regel hatten die durchschnittlich schneller fahrenden Probanden der KG-Completer mehr kritische Verkehrsszenen zu bewältigen als die langsamer fahrenden Probanden der EG-Completer. Eine differenzierte Auswertung nach Streckenabschnitten zum Vergleich der beiden Completer-Gruppen wäre deshalb nur begrenzt aussagekräftig. Allerdings ergaben sich auch Fahrfehler aus anderen Gründen als kritischen Verkehrsszenen (z. B. aufgrund von Problemen mit der Fahrdynamik und aus Fahrunsicherheiten), weshalb zumindest ein grober, zusammenfassender Überblick über die dokumentierten Fahrfehler gegeben werden soll.

Unabhängig vom Streckenabschnitt zeigt, sich, dass ein größerer Anteil der Probanden der EG-Completer im Vergleich zu den KG-Completern mindestens einmal auf der Teststrecke ungeplant die Spur verließ (EG-Completer: 64,7 % vs. KG-Completer: 44,8 %), falsch abbog (EG-Completer: 17,6 % vs. KG-Completer: 0,0 %) oder einen Handzeichen-Fehler machte (EG-Completer: 11,8 % vs. KG-Completer: 6,9 %). Bei den KG-Completern überwogen dagegen Fahrfehler wie Kollisionen (KG-Completer: 34,5 % vs. EG-Completer: 23,5 %) und Vorfahrtsfehler (KG-Completer: 6,9 % vs. EG-Completer: 0,0 %). Diese Fehlerarten sind im Vergleich zu den überwiegenden Fehlerarten der EG-Completer als drastischer zu bewerten, wobei berücksichtigt werden muss, dass die KG-Completer aufgrund ihrer höheren Fahrgeschwindigkeit mehr kritischen Verkehrsszenen ausgesetzt waren. Zudem könnten die teilweise ungewöhnlich hohen Maximalgeschwindigkeiten in der Gruppe der KG-Completer ebenfalls ein Grund für die hohe Anzahl an Kollisionen und Vorfahrtsfehler gewesen sein (s. Kapitel 6.5).

Die Fehlerart „Spur verlassen“ (Gesamt-Fehlerhäufigkeit über alle Probanden und Streckenabschnitte: n = 40) kam v. a. am Streckenabschnitt 13 vor, an dem zwei Kreuzungen direkt aufeinanderfolgen und der Proband mit geringem Abstand von einem Pkw überholt

wird, der anschließend knapp hinter dem Probanden rechts abbiegt. Des Weiteren führten Streckenabschnitte mit eigenen Abbiegemanövern sowie Abschnitte mit Wechseln der Führungsform hin zu einem baulich getrennten Radweg häufiger zum ungeplanten Spur verlassen.

Kollisionen (Gesamt-Fehlerhäufigkeit über alle Probanden und Streckenabschnitte: $n = 16$) traten gehäuft im Kreisverkehr auf sowie auf den Streckenabschnitten 17 und 18 auf, bei denen den Probanden unerwartet die Vorfahrt genommen wird bzw. bei Streckenabschnitten, bei denen sie von Pkw-Fahrern durch z. B. enge Überhol- und Abbiegemanöver bedrängt werden (Streckenabschnitte 11, 13 und 15).

Handzeichen-Fehler konnten insgesamt viermal beobachtet werden, zweimal im Kreisverkehr und zweimal beim Rechtsabbiegen. Zudem wurde bei den Senioren insgesamt dreimal beobachtet, dass sie entgegen der Navigationsansage im Kreisverkehr bzw. an einer Rechtsabbiege-Stelle falsch abgebogen waren.

Zusätzlich zu den Fahrfehlern wurde von den Versuchsleitern dokumentiert, ob der Proband unsicher und/oder übervorsichtig gefahren ist. Da sich dieses beobachtete Verhalten i. d. R. über mehrere Streckenabschnitte zeigte, wurde bei den Auswertungen nicht nach Streckenabschnitten differenziert.

Dem Ergebnis zufolge wurde ein übervorsichtiges Fahrverhalten in beiden Completer-Gruppen relativ selten dokumentiert (EG-Completer: 11,8 % vs. KG-Completer: 6,9 %). Allerdings haben aus Sicht der Versuchsleiter mehr Probanden der EG-Completer (41,2 %) gegenüber den KG-Completern (10,3 %) ein unsicheres Fahrverhalten gezeigt.

6.4.3 Fahrerleben (Selbsturteil)

Bei 13 von 19 Streckenabschnitten sollten die Probanden während der Fahrt auf einer Skala von 0–10 angeben, wie kritisch bzw. wie realistisch sie die soeben durchfahrene Verkehrsszene subjektiv erlebt hatten. Nicht allen Probanden gelang es, während der Fahrt diese beiden Fragen kurz und knapp für alle 13 Streckenabschnitte zu beantworten. Aufgrund der relativ hohen Anzahl an Missings wurden keine Signifikanztestungen vorgenommen.

Kritische Verkehrsszenen:

Es zeigt sich, dass die beiden Completer-Gruppen der EG und KG in ihren durchschnittlichen Bewertungen relativ nah beieinander liegen (Bild 39). Am kritischsten wurden die beiden letzten Streckenabschnitte bewertet, bei denen den Probanden unerwartet die Vorfahrt genommen wird. Korrespondierend zu den Fahrfehlern wurden v. a. die Streckenabschnitte kritisch bewertet, die objektiv auch eine gefährliche Verkehrsszene für die Probanden darstellte, was – wie im vorherigen Abschnitt erläutert – wiederum von der Fahrgeschwindigkeit der Probanden abhing. Während die durchschnittlich schneller fahrenden KG-Completer den Abschnitt 17 „Gelbes Lieferfahrzeug nimmt Vorfahrt“ am kritischsten bewerteten, empfanden die EG-Completer den letzten Abschnitt „Weißer Pkw nimmt Vorfahrt“ am kritischsten. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich bei dem 6. Streckenabschnitt „Bushaltestelle – Kind quert überraschend die Straße“, den nur die KG-Completer als mittelmäßig bis eher kritisch einstufen. Gleichermäßen kamen sie im Abschnitt 11 aufgrund ihrer geringen Fahrgeschwindigkeit selten in Verlegenheit, den vor sich fahrenden, langsamen Radfahrer überholen zu müssen. Dass sie diesen Streckenabschnitt 11 dennoch als mittelmäßig kritisch bewertet haben, ist darin begründet, dass sie am Schluss der Verkehrsszene zusätzlich von einem Pkw geschnitten wurden.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass mehrere objektiv gefährlichere Verkehrsszenen – deren Gefährlichkeit von der Fahrgeschwindigkeit abhing – von den Probanden subjektiv auch als kritisch erlebt wurden.

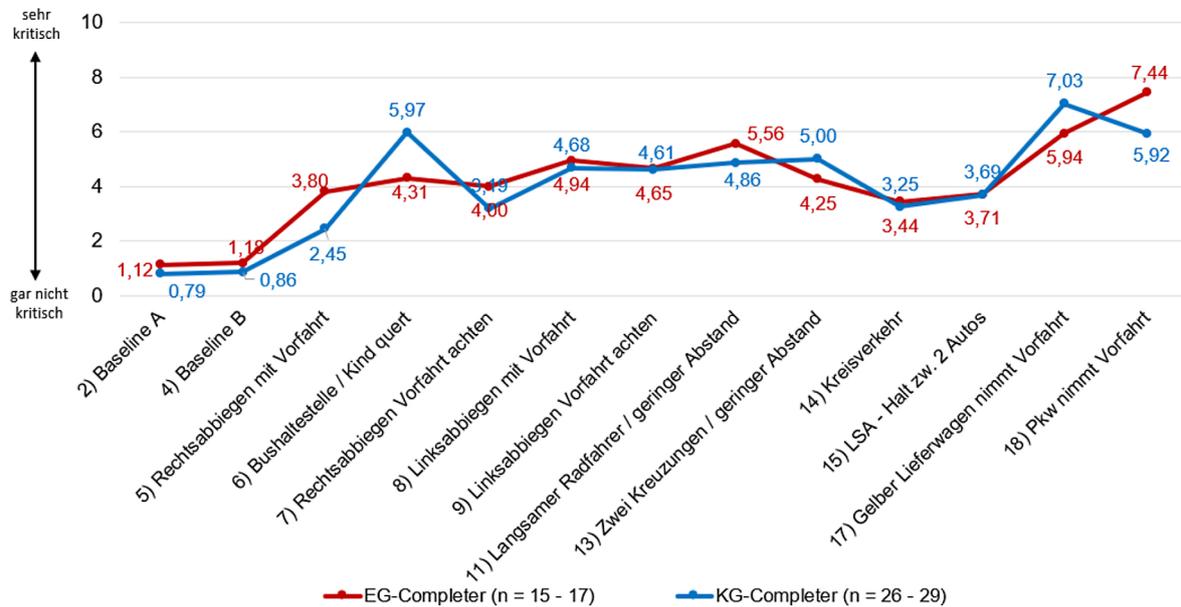


Bild 39: Einschätzung, wie kritisch die Verkehrsszene erlebt wurde (Selbsturteil)

Realistische Verkehrsszenen:

Zur Frage, wie realistisch die einzelne Verkehrsszenen erlebt wurde, zeigt sich, dass fast alle 13 Verkehrsszenen sehr positiv bewertet wurden, wobei kaum Unterschiede zwischen den beiden Completer-Gruppen zu verzeichnen sind (Bild 40). Lediglich im Streckenabschnitt 2 sind die Bewertungen der KG-Completer ($SD = 2,32$) tendenziell besser als die der EG-Completer ($MW = 7,83$ versus $MW = 6,06$). Vereinzelt wurde bei diesem reizarmen Baseline-Abschnitt kritisiert, dass unrealistisch wenig Verkehr auf den Straßen unterwegs gewesen sei.

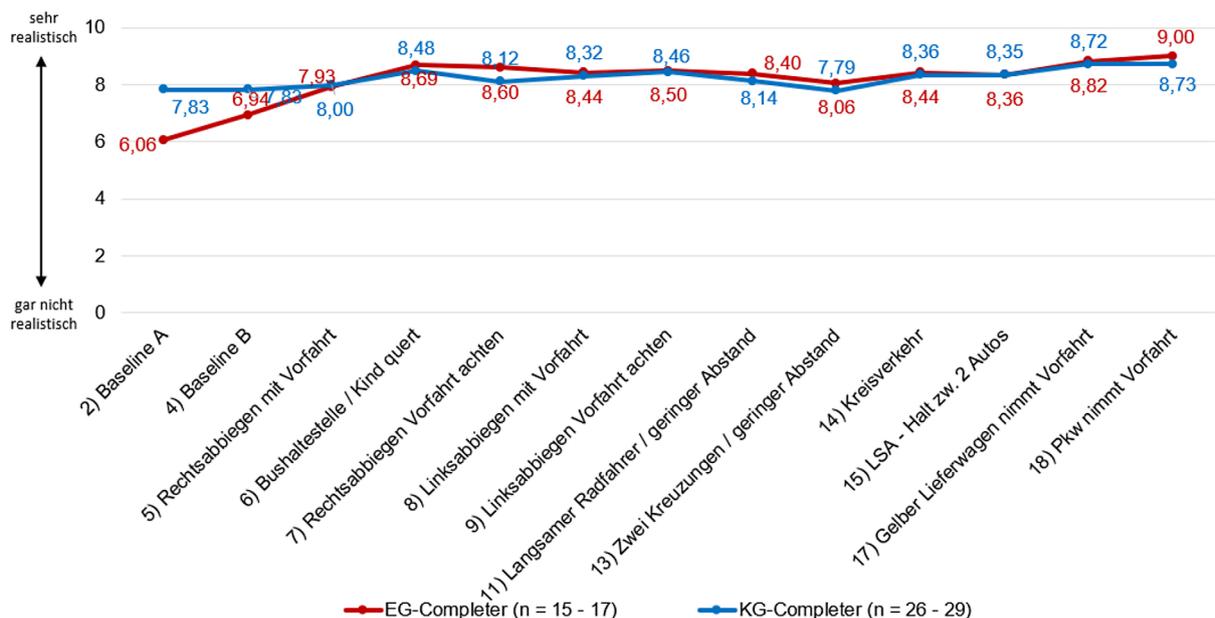


Bild 40: Einschätzung, wie realistisch die Verkehrsszene erlebt wurde (Selbsturteil)

6.5 Bewertung des Fahrradsimulators (Selbsturteil)

Nach den vier Simulatorfahrten sollten die Probanden im Nebenraum den Abschluss-Fragebogen ausfüllen, um den Fahrradsimulator und die dazugehörige SILAB-Software abschließend zu bewerten. Da davon ausgegangen wird, dass sich nur die beiden Completer-Gruppen ein umfassendes Bild von dem Fahrradsimulator machen konnten, werden auch hier nur die Probandenbewertungen der beiden Completer-Gruppen in die Auswertungen miteinbezogen.

Fahrdynamik:

Als erstes sollten die Probanden ihr Fahrgefühl in Bezug auf verschiedene Eigenschaften der Fahrdynamik auf einer Skala von 1 (sehr unrealistisch) bis 15 (sehr realistisch) einschätzen (Bild 41). So wurde von den EG-Completern insbesondere das Geschwindigkeitsgefühl mit einem Mittelwert von 10,41 ($SD = 2,60$) insgesamt als ziemlich realistisch eingestuft. Die KG-Completer bewerteten dagegen das geradeaus Fahren als am realistischsten ($MW = 10,56$; $SD = 2,28$). Am wenigsten realistisch wurde von beiden Gruppen das Bremsen empfunden (EG-Completer: $MW = 7,47$; $SD = 3,36$ /KG-Completer: $MW = 5,85$; $SD = 2,82$). Es lässt sich zwischen den beiden Completer-Gruppen kein signifikanter Haupteffekt nachweisen ($F(8, 9) = 1.619, p = .244, \eta^2_{\text{part}} = .590$). Rein deskriptiv fällt jedoch auf, dass die KG-Completer sowohl das Erleben der Fahrgeschwindigkeit als auch das Bremsen unrealistischer einschätzten als die EG-Completer. Dies könnte möglicherweise mit den im Kapitel 6.4.1 ungewöhnlich hohen Maximalgeschwindigkeiten zusammenhängen, die mehrere Probanden in der KG erreichten.

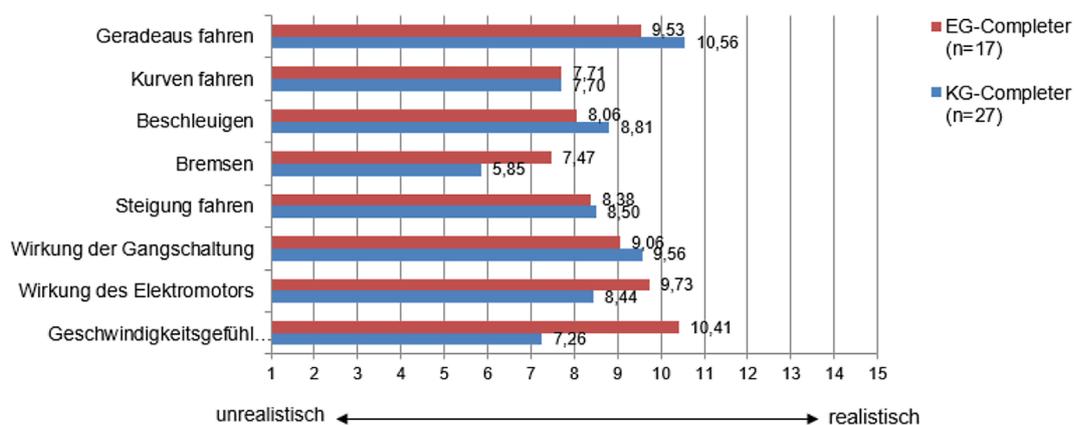


Bild 41: Erleben der Fahrdynamik (Selbsturteil)

Verkehrsszenario und andere Verkehrsteilnehmer:

Das auf den 10 Monitoren dargestellte Verkehrsszenario und die Darstellung der anderen Verkehrsteilnehmer (Bild 42) sind insgesamt noch realistischer bewertet worden als die oben beschriebene, erlebte Fahrdynamik. In beiden Gruppen erreichen alle Bewertungen Mittelwerte über 8,00. Während die Probanden der EG-Completer besonders das Fahrverhalten anderer Autos und Radfahrer als realistisch einschätzten, haben bei den Probanden der KG-Completer die grafische Darstellung der Häuser und die Streckenführung besonders positiv in der Bewertung abgeschnitten. Zwischen den beiden Gruppen zeigt sich auch hier kein signifikanter Haupteffekt ($F(10, 29) = 1.295, p = .279, \eta^2_{\text{part}} = .309$).

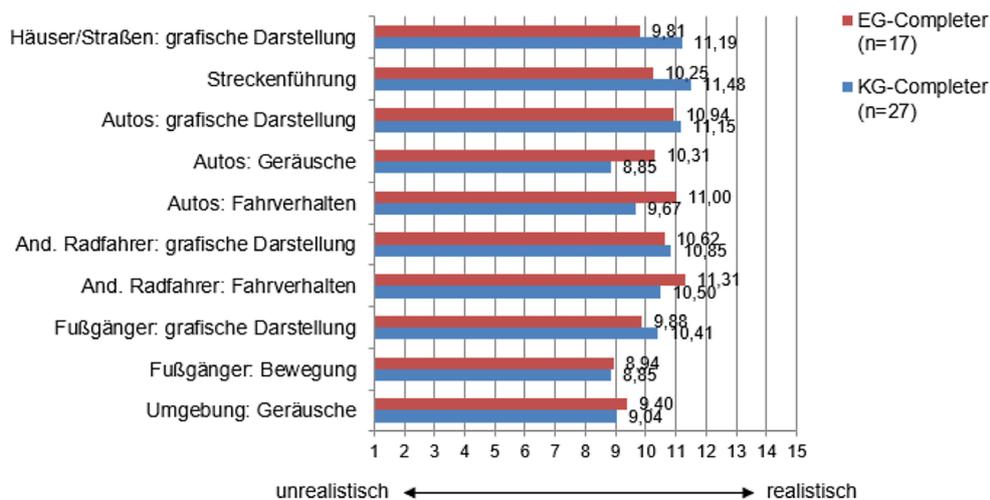


Bild 42: Erleben der Verkehrsszenarien und anderer Verkehrsteilnehmer (Selbsturteil)

Technische Umsetzung:

Sowohl der Bildfluss der Simulation als auch die Übertragung der Bewegungen am Fahrradsimulator auf die Simulation stuften die Probanden beider Completer-Gruppen mit Mittelwerten zwischen 9 und 11 als ziemlich realistisch ein (Bild 43). Auch wenn die Probanden der EG-Completer deskriptiv beide Aspekte besser bewerteten als die der KG-Completer, erweist sich der Haupteffekt Gruppe als nicht signifikant ($F(2, 40) = 0.831, p = .443, \eta^2_{\text{part}} = .040$).

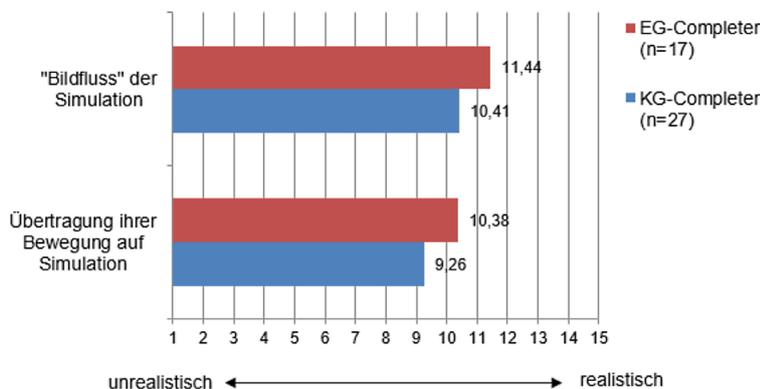


Bild 43: Erleben der technischen Umsetzung (Selbsturteil)

Fahrverhalten im Vergleich zu Realfahrten:

In einer weiteren Frage sollten die Probanden ihr Fahrverhalten mit dem Fahrradsimulator im Vergleich zu Realfahrten in Bezug auf Geschwindigkeit, Fahren auf geraden Strecken versus in Kurven sowie das Einhalten der StVO beurteilen (Bild 44). Mit einer Antwortskala von 1–15 konnten sie zwischen den beiden Endpunkten eines semantischen Differenzials abstufen (z. B. in Bezug auf die Geschwindigkeit: 1 = „viel langsamer“ bis 15 = „viel schneller“). Bei der Signifikanztestung zeigt sich zwischen den beiden Completer-Gruppen ein signifikanter Haupteffekt ($F(4, 38) = 3.531, p = .015, \eta^2_{\text{part}} = .271$). Die Post-hoc-Tests ergeben, dass sich die beiden Gruppen signifikant bzgl. Geschwindigkeit ($p = .040, \eta^2_{\text{part}} = .099$) und Kurven fahren ($p = .041, \eta^2_{\text{part}} = .098$) unterscheiden: Während die Probanden der EG-Completer ihre Geschwindigkeit mit dem Fahrradsimulator im Vergleich zu Realfahrten mit einem durchschnittlichen Wert von 6,31 eher als langsamer einstufen, gaben die Probanden der KG-Completer mit einem Mittelwert von 8,41 auf der 15-Punkte-Skala einen Wert

im mittleren Bereich an, d. h. sie fahren ihrer Einschätzung nach auf dem Fahrradsimulator ungefähr genauso schnell wie bei Realfahrten. Dies ist insofern erstaunlich, als dass mehrere Probanden der KG ungewöhnlich hohe Maximalgeschwindigkeiten erreichten und gerade die Geschwindigkeit als nicht so realistisch einstufen (Bild 41). Bezüglich des Fahrverhaltens in Kurven schätzten sich die Probanden der KG-Completer bei Nutzung des Fahrradsimulators als deutlich unsicherer ein ($MW = 4,63$; $SD = 2,69$), sowohl im Vergleich zu Realfahrten als auch im Vergleich zu den EG-Completern ($MW = 6,69$; $SD = 3,70$).

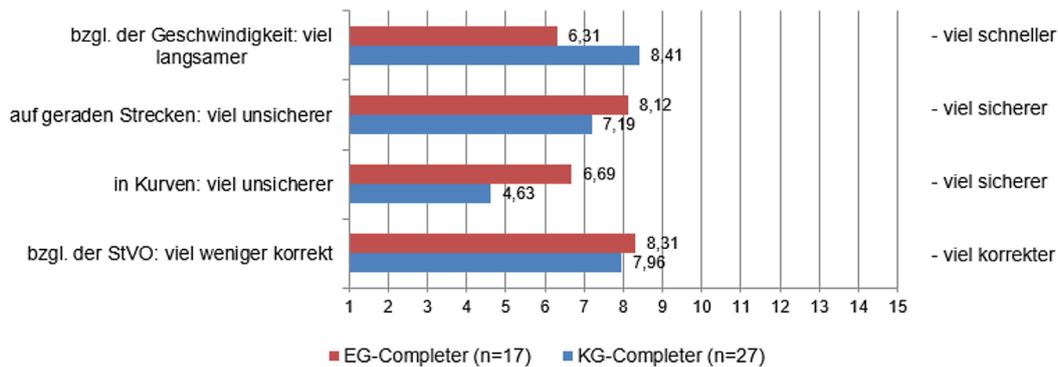


Bild 44: Fahrverhalten im Vergleich zu Realfahrten

Abschließende Gesamtbewertung:

Abschließend bewerteten beide Gruppen das Gelingen der Immersion, d. h. das subjektiv wahrgenommene Eintauchen in die virtuelle Umgebung, sowie den Realismus (der Simulatorfahrt) insgesamt (Bild 45). Diese beiden zusammenfassenden Punkte stuften beide Gruppen als eher hoch ein. Bei den KG-Completern fällt die Bewertung deskriptiv noch etwas positiver aus als bei den EG-Completern, wobei sich kein signifikanter Haupteffekt ergibt ($F(2, 40) = 1.302$, $p = .283$, $\eta^2_{\text{part}} = .061$).

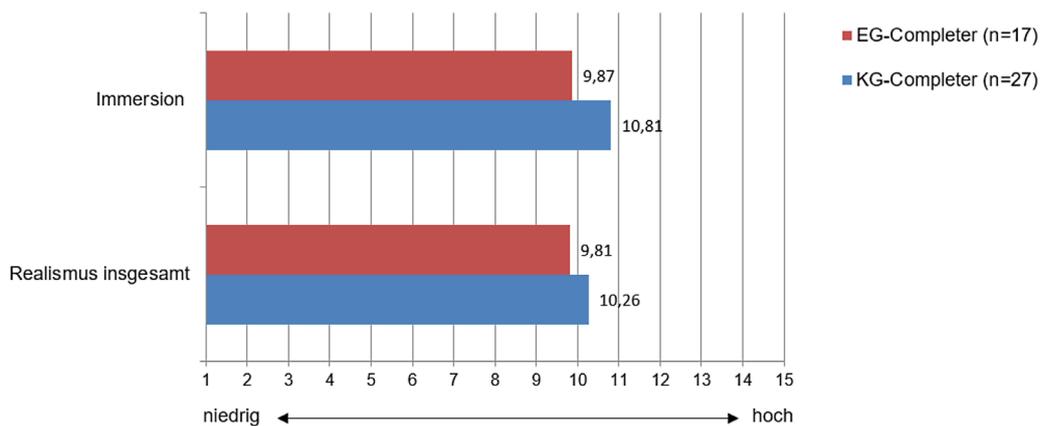


Bild 45: Abschließende Gesamtbewertung (Selbsturteil)

7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Systematische Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten von Fahrradsimulatoren in der Verkehrssicherheitsforschung sind bisher national wie international noch rar. Auf der Basis von Erfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator der BASt wurde eine erste Machbarkeitsstudie für den neuen Fahrradsimulator konzipiert. Zum Einsatz kam ein statischer Fahrradsimulator, der ebenfalls wie die Simulatorsoftware SILAB vom WIVW entwickelt wurde.

Senioren stellen als Fahrradfahrer in der Verkehrssicherheitsforschung aufgrund ihrer steigenden Mobilität mit dem Fahrrad bei zugleich erhöhter Vulnerabilität eine wichtige Zielgruppe dar. Deshalb wurden sowohl Fahrradfahrer ab einem Alter von 65 Jahren (EG), als auch vergleichend Probanden im Alter von 25–50 Jahren (KG) in diese Machbarkeitsstudie einbezogen. Für beide Untersuchungsgruppen sollten erste Erkenntnisse zu den Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen zum Einsatz des Fahrradsimulators für Fahrverhaltensbeobachtungen gewonnen werden. Vor der Testfahrt wurden drei Übungsfahrten zur Eingewöhnung durchgeführt, die ebenfalls evaluiert wurden. Bei allen vier Fahrten wurde neben dem Bewältigen der Fahraufgaben auch die Verträglichkeit der Simulatorfahrten geprüft. Zur Datengewinnung kamen – neben der Verhaltensbeobachtung (Versuchsleiter-sicht/Fremdurteil) und der Fahrdatenaufzeichnung (Geschwindigkeitsmessung) – mehrere Fragebögen (Probandensicht/Selbsturteil) zum Einsatz. Zudem nahmen die Probanden subjektive Einschätzungen zur Validität (Augenscheinvalidität) des Fahrradsimulators bzw. des Fahrerlebens und der virtuellen Fahrumgebung vor. Im Folgenden sollen die Ergebnisse zusammenfassend berichtet und diskutiert werden.

7.1 Ausgangsbedingungen der Probanden der EG und KG im Vergleich

Die beiden Untersuchungsgruppen umfassen 35 ältere Radfahrer in der Experimentalgruppe (EG: 65–89 Jahre; MW = 72,43 Jahre/65,7 % männlich; 34,3 % weiblich) und 31 Radfahrer in der Kontrollgruppe (KG: 25–50 Jahre; MW = 38,42 Jahre/48,4 % männlich; 51,6 % weiblich). Beide Gruppen weisen ein breites Altersspektrum auf. Von den 35 Senioren waren zum Zeitpunkt der Untersuchung 11 Probanden 75 Jahre und älter. Diese werden in der Verkehrssicherheitsforschung oftmals als ältere Senioren – von den jüngeren Senioren (65–74 Jahre) – abgegrenzt (SCHUBERT et al., 2018). Diese Unterteilung ist auch deshalb relevant, da gemäß Unfallanalysen ältere Senioren als Radfahrer besonders vulnerebel sind und eine erhöhte Wahrscheinlichkeit haben, bei einem Unfall zu versterben.

Die Auswertung des Vorherfragebogens zeigt einige Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsgruppen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Auf diese wird im Folgenden eingegangen. Dabei wird auch diskutiert, inwiefern die beiden Untersuchungsgruppen – verglichen mit anderen Studienergebnissen – repräsentativ sind. Ziel ist es u. a. abzuklären, ob die gefundenen Unterschiede zwischen den beiden Gruppen den zu erwartenden Altersunterschieden entsprechen, oder andernfalls auf eine besondere Selektivität bei der Stichprobenauswahl hindeuten könnten, die wiederum bei der Interpretation der weiteren Ergebnisse berücksichtigt werden müssten.

Einige Probanden hatten vor dieser Studie bereits Erfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator der BASt sammeln können, wobei der Anteil der simulatorerfahrenen Probanden in der KG

signifikant größer ist als in der EG der älteren Radfahrer (EG: 22,9 % vs. KG: 58,1 %). Vergleicht man nur die beiden Teilgruppen der Studien-Completer (d. h. die Probanden, die an allen Übungsfahrten und der Testfahrt komplett teilgenommen haben), dann gleichen sich die Anteile der simulatorerfahrenen Probanden etwas an (EG-Completer: 35,3 % vs. KG-Completer: 58,6 %). Dieser – wenn auch aufgrund der kleinen Teilstichproben nicht signifikante – Unterschied könnte die Verträglichkeit in den beiden Gruppen beeinflusst haben, da nur Probanden wiederholt zu Simulatorstudien eingeladen werden, die in einer Vorgängerstudie keine oder wenige Symptome der Simulatorkrankheit gezeigt hatten (siehe auch Kapitel 7.2). Für diese Annahme spricht auch, dass von den 8 Senioren mit Simulatorerfahrung nur 2 vorzeitig abbrechen mussten. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass sich die Abbruchquoten bei den Pkw-Fahrsimulatorstudien ohnehin als sehr gering erwiesen haben (SCHÖMIG et al., 2015; SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018) – insbesondere für jüngere Fahrer (< 55 Jahre). Deshalb ist zumindest bei der KG eher nicht von einer besonderen Selektivität bei der Strichprobenzusammenstellung und damit verbunden eines systematischen Einflusses auszugehen. Vielmehr ist bei der überwiegenden Anzahl von jüngeren Probanden grundsätzlich eine relativ gute Verträglichkeit zu erwarten.

Ob darüber hinaus die Simulatorerfahrung mit dem Pkw-Fahrsimulator sich möglicherweise auch auf die Verträglichkeit oder die Fahr- bzw. Adaptionfähigkeit im Sinne eines Gewöhnungseffekts an den Fahrradsimulator auswirken könnte, kann nicht so einfach beantwortet werden. Bezüglich der Verträglichkeit ist zu beachten, dass grundsätzliche Gewöhnungseffekte bei ähnlichen Simulatoren wie hier möglich und in Form von Trainings i. d. R. auch beabsichtigt sind. So ist beiden Simulatoren gemeinsam, dass die virtuelle Verkehrsumgebung über die Software SILAB erstellt wurde. Allerdings ist nicht geklärt, inwiefern ein möglicher Gewöhnungseffekt auch über einen längeren Zeitraum (zu einem Vorgängerprojekt) anhält. Zudem unterscheidet sich die Darstellungsform der virtuellen Umgebung (hier per Monitore vs. beim Pkw-Fahrsimulator per Beamer), was wiederum eine unterschiedliche Wirkung auf die Verträglichkeit gehabt haben könnte. Bezüglich der Fahr- und Adaptionfähigkeit ist zu bedenken, dass die in den Simulatorstudien genutzten Verkehrsumgebungen naturgemäß in Abhängigkeit vom Verkehrsmittel (z. B. Fahrradfahren auf dem Radweg versus Autofahren auf der Autobahn) variieren. Abgesehen von der virtuellen Verkehrsumgebung sind zudem die geforderten Fahrfähigkeiten für die beiden Simulatoren grundlegend verschieden, weshalb mögliche Lerneffekte aus Vorerfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator, die sich auf die Fahr- bzw. Adaptionfähigkeit an den Fahrradsimulator auswirken könnten, eher unwahrscheinlich sind. Abschließend kann unter Berücksichtigung dieser verschiedenen Aspekte nicht mit Sicherheit ein systematischer Einfluss durch den höheren Anteil an simulatorerfahrenen Probanden ausgeschlossen werden. Da jedoch auch viele Aspekte dagegen sprechen, ist – wenn überhaupt – eher nur von einem geringen Einfluss auszugehen.

Ein weiterer Punkt betrifft die mögliche Selektivität bei der Stichprobenauswahl aufgrund der definierten Teilnahmevoraussetzungen. Eine Voraussetzung war, dass die Probanden mindestens einmal pro Monat Fahrrad fahren. Im Vergleich zur gleichaltrigen Gesamtbevölkerung ist insbesondere bei den Senioren deshalb davon auszugehen, dass diese überdurchschnittlich körperlich fit sind, da der Anteil der Nichtradfahrer mit dem Alter steigt – ab 70 Jahre beträgt der Nichtradfahreranteil 51 % und ab 80 Jahre 74 % (NOBIS, 2019). Vergleicht man die hier untersuchten älteren Radfahrer allerdings mit der (Teil)stichprobe der Fahrrad fahrenden Gleichaltrigen aus der MiD-Studie, dann zeigt sich, dass diese zumindest in der Häufigkeit des Radfahrens grundlegend übereinstimmen: Circa ein Drittel der Radfahrer fährt täglich, ein weiteres Drittel mehrmals pro Woche und das letzte Drittel seltener als einmal pro Woche.

Die am häufigsten genannten typischen Fahrtwege der älteren Probanden sind Fahrradausflüge und Fahrradfahren im Urlaub, wohingegen die 25–50-jährigen Probanden das Fahrrad vor allem dazu nutzen, um andere kurze Wege zu bewältigen. 29 % der Probanden der KG nutzen das Fahrrad als Verkehrsmittel zur Arbeit/Universität etc., während dieses Fahrziel erwartungsgemäß nur von einzelnen Probanden der Senioren genannt wurde. Auf die Frage nach der Fahrmotivation gaben die Senioren dazu passend deutlich häufiger an, aus Spaß und zur Gesundheitsförderung Fahrrad zu fahren. Die Probanden der KG schätzen das Fahrrad hingegen v. a. als flexibles und günstiges Verkehrsmittel. Zu ähnlichen Unterschieden zwischen älteren und jüngeren Radfahrern kommen auch mehrere andere wissenschaftliche Studien (INFAS, DLR, IVT UND INFAS 360, 2018; STEFFENS et al., 1999), so dass hier von repräsentativen Altersunterschieden ausgegangen werden kann. Die häufigen Fahrradausflüge der Senioren scheinen sich auch auf die Streckenlängen auszuwirken, da die älteren Radfahrer häufiger angaben, regelmäßig Strecken von über 20 km Länge zu fahren und dies häufiger in ländlicher Umgebung. Das regelmäßige Fahren dieser längeren Strecken unterstreicht die Vermutung, dass die älteren Probanden für ihr Alter körperlich sehr fit und womöglich besonders kompetente Radfahrer sind, was wiederum als ein Hinweis für eine besondere Selektivität der Stichprobe sein könnte. Möglicherweise werden die langen Strecken jedoch auch durch den höheren Nutzungsanteil von Pedelects in der EG begünstigt (NOBIS, 2019).

Die Probanden der KG sind im Vergleich zu den Senioren häufiger mit dem Fahrrad in Großstädten unterwegs. Übereinstimmend hierzu gaben die Senioren signifikant häufiger an, das Fahrradfahren in großen Städten bewusst zu meiden. Die Auswertung der selbstberichteten Geschwindigkeit ergibt, dass tendenziell die Radfahrer in der KG i. d. R. schnell (> 25 km/h) fahren, während sich mehr Senioren zu den langsameren Radfahrern (≤ 15 km/h) zählen. Entsprechend nannten die Radfahrer der KG auch mehr riskante eigene Fahrverhaltensweisen. Interessanterweise erlebten jedoch in den vorausgegangen 3 Jahren mehr Probanden der EG als KG Alleinunfälle (41,1 % vs. 22,7 %). Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Unfälle ein sehr seltenes Ereignis darstellen und die Stichprobe für aussagekräftige Ergebnisse zu klein ist, so dass das Ergebnis statistisch nicht abgesichert werden kann.

Die älteren Probanden fahren ihren Angaben zufolge – übereinstimmend mit anderen Studien (PLATHO et al., 2021) – häufiger ein Pedelect als die 25–50-jährigen Probanden (EG: 22,9 % vs. KG: 9,7 %), wohingegen diese häufiger angaben, ein Mountainbike zu fahren. Ebenfalls zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Häufigkeit des Helmtrensens, der von 60 % der Senioren immer getragen wird, während diese Antwortkategorie in der KG von 38,7 % der Probanden gewählt wurde. Damit liegt die angegebene Helmtragequote in beiden Untersuchungsgruppen deutlich über der im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen per Beobachtung erhobenen altersabhängigen Helmtragequote von ca. 15–25 % (EVERS, 2020) sowie auch über der in der MiD-Studie ermittelten Helmtragequote (NOBIS, 2019). Dieses Ergebnis deutet auf eine besondere Selektivität bei der Stichprobensammensetzung hin, die womöglich in einem hohen Sicherheitsbedürfnis oder aber auch in einer besonders ambitionierten, sportlichen Fahrweise begründet sein könnte. Allerdings ist auch nicht auszuschließen, dass die Probanden sozial erwünscht geantwortet haben.

Im Vorherfragebogen wird nach verschiedenen gesundheitlichen Aspekten gefragt, die in Bezug auf das Fahrverhalten und -erleben sowie möglichen Symptomen der Simulatorkrankheit relevant sein könnten. Den eigenen Angaben zufolge leiden die Senioren seltener an Reiseübelkeitsbeschwerden als die Probanden der KG. Dafür berichteten mehr Senioren, durch ein verringertes Hör- und Kopfdrehungsvermögen sowie Muskelkraft beim Fahrradfahren beeinträchtigt zu sein (vgl. hierzu Kapitel 2.22.3). Ebenfalls gaben deutlich

mehr Senioren an, in den letzten 48 Stunden ein Medikament sowie Alkohol zu sich genommen zu haben. Beeinträchtigungen durch Allergien wurden demgegenüber häufiger von den 25–50-jährigen Probanden genannt. Im Durchschnitt gaben die Senioren für die vorherige Nacht sowie auch grundsätzlich eine längere Schlafdauer an als die Probanden der KG; bei beiden Untersuchungsgruppen beträgt die durchschnittliche Schlafdauer jedoch über 7 Stunden pro Nacht.

Schließlich sollten alle Probanden noch angeben, wie sie ihr Fahrverhalten im Vergleich zu früher einschätzten. Die Senioren gaben tendenziell häufiger an, dass sich ihre Fahrperformanz im Vergleich zu früher verschlechtert hätte und sie inzwischen vorsichtiger fahren würden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die beschriebenen Gruppenunterschiede größtenteils den aus der Literatur zu erwartenden Altersunterschieden entsprechen. So bezeichnen sich die Senioren im Vergleich zu den 25–50-jährigen Probanden als vorsichtiger und langsamere Fahrradfahrer, die risikoreichere Fahrbedingungen wie widriges Wetter und eine hohe Verkehrsdichte in Städten häufiger meiden. Zudem scheint den Senioren im Durchschnitt bewusst zu sein, dass ihre Fahrfähigkeiten im Alter etwas abgenommen haben. Auffallend ist die in beiden Untersuchungsgruppen überdurchschnittliche hohe Helmtragequote, insbesondere bei den Senioren. Vorausgesetzt die Probanden haben nicht sozial erwünscht geantwortet, könnte dies für ein besonderes Sicherheitsbedürfnis sprechen. Andererseits könnte dies auch ein Hinweis für ausgeprägte sportliche Ambitionen insbesondere seitens der Senioren darstellen, da viele der teilgenommenen Senioren regelmäßig Streckenlängen von 20 km und länger fahren. Dies deutet daraufhin, dass möglicherweise überdurchschnittlich fitte und motivierte (ältere) Probanden an der Studie teilgenommen haben könnten. Vor dem Hintergrund des freiwilligen Untersuchungssettings ist es durchaus plausibel, dass sich überdurchschnittlich kompetente Radfahrer der Studie zur Verfügung gestellt haben. Ein weiterer, zu berücksichtigender Punkt betrifft den höheren Anteil an simulatorerfahrenen Probanden in der KG im Vergleich zur EG. Hier wird jedoch eher nur von einem geringen systematischen Einfluss durch selektive Stichprobenzusammensetzung seitens der Probanden der KG ausgegangen, wenn überhaupt, da sich die beiden Simulatoren und deren Handling in vielerlei Hinsicht unterscheiden und die Drop-out-Rate bei Probanden unter 50 Jahren ohnehin sehr gering ist (siehe nächstes Kapitel).

7.2 Drop-out-Rate und Simulatorkrankheit

Die Drop-out-Rate fällt in den beiden Untersuchungsgruppen sehr unterschiedlich aus. Während von den Fahrern der KG nur 2 Probanden (6,5 %) das Experiment vorzeitig abbrechen, waren es in der EG ca. die Hälfte der Probanden. Auch innerhalb der Seniorengruppe zeigt sich ein Alterseffekt: Bei den jüngeren Senioren (65–74 Jahre) beträgt die Drop-out-Rate nur 41,7 %, wohingegen 8 von 11 (72,7 %) älteren Senioren (75–89 Jahre) nicht bis zum Ende teilnahmen.

Insgesamt betrachtet ist damit eine deutlich höhere Ausfallquote zu verzeichnen als in der Machbarkeitsstudie mit dem Pkw-Fahrsimulator der BAST (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018). Hier brachen lediglich 7 von 31 Senioren (33 %; 5 während der Eingewöhnung, 2 während der Testfahrt) vorzeitig ab und nur einer von den jüngeren Fahrern (4 %). Allerdings sind die beiden Machbarkeitsstudien nur bedingt vergleichbar. Zum einen waren die Senioren in der Pkw-Fahrsimulatorstudie deutlich jünger: Die Altersspanne der 26 Probanden, die bis zur Testfahrt teilnahmen, betrug 61–77 Jahre (hier 65–89 Jahre), d. h. auch

Probanden unter 65 Jahren wurden zu den Senioren gezählt und es haben kaum Senioren ab 75 Jahre und älter teilgenommen. Gerade die älteren Senioren haben jedoch in dieser Studie zu der hohen Abbruchquote beigetragen. Betrachtet man nur die jüngeren Senioren, dann stimmt die Drop-out-Rate mit der von TRICK und CAIRD (2011) überein. Zum anderen sind – wie bereits oben erwähnt – beim Fahrradsimulator grundlegend andere Fahrfähigkeiten im Vergleich zum Pkw-Fahrsimulator gefordert und die Validität der Fahrdynamik ist anders als bei den Pkw-Fahrsimulatoren noch nicht systematisch und tiefgehend untersucht worden. Während in der Machbarkeitsstudie mit dem Pkw-Fahrsimulator, die Probanden nur aufgrund von Symptomen der Simulatorkrankheit vorzeitig abbrachen, mussten in dieser Fahrradsimulatorstudie 13 von insgesamt 20 Drop-Outs in erster Linie aufgrund von Problemen mit dem Handling des Fahrradsimulators – insbesondere mit der Lenkung – bereits während der kurzen Eingewöhnungsfahrten (die viel kürzer waren als in der Pkw-Fahrsimulatorstudie, s. Kapitel 7.3.1) abbrechen. Diese frühen Abbrüche kamen ausschließlich bei älteren Probanden der EG vor. Ihnen gelangt es zumeist nicht, auf der Fahrbahn zu bleiben, was schließlich bei einigen Probanden auch wieder zur Unverträglichkeit beitrug.

Wie im Kapitel 3.2.1 erläutert, unterscheidet sich die Lenkung in diesem statischen, wenn auch leicht passiv beweglichen Fahrradsimulator dahingehend, dass diese nur durch Lenkereinschlag und nicht durch Schwerpunktverlagerung vorgenommen werden kann. Insofern ist eine gewisse Adaption an die Fahrdynamik des Fahrradsimulators erforderlich. Dieser Anpassungsprozess ist dadurch erschwert, dass bei einer Realfahrt das Lenken in der Regel ein jahrelang eingeübter, schneller und unbewusster Verhaltensvorgang ist. Auch die 25–50-jährigen Probanden benötigten eine gewisse Eingewöhnungszeit, jedoch gelang ihnen der Adaptionprozess relativ schnell, so dass sich die drei Übungsfahrten als ausreichend erwiesen. Dieser deutliche Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsgruppen wirft die Frage auf, ob möglicherweise die längere Fahrerfahrung der älteren Probanden die Adaption an die Fahrdynamik des Fahrradsimulators erschwert hat, oder ob unabhängig davon das Alter grundsätzlich zu einer verminderten kognitiven Flexibilität und damit zusammenhängend zu einer verlangsamten motorischen Adaption an neue Anforderungen führt (NITSCH et al., 2007). Zumindest ist davon auszugehen, dass während der Adaptionphase schnelle Verhaltenskorrekturen erforderlich sind, bei denen ältere Probanden aufgrund durchschnittlich längerer Reaktionszeiten sowie vermehrten Schwierigkeiten in der Koordination der Gliedmaßen tendenziell eher benachteiligt sind (HOFF, 2018; MORGAN et al., 1994; SOLESIO-JOFRE et al., 2014).

Probanden, die demgegenüber eindeutig nur aufgrund von Verträglichkeitssymptomen abbrechen mussten, brachen alle erst bei der letzten Fahrt, der eigentlichen Testfahrt, ab. Das traf für die beiden Probanden aus der KG, wie auch für fünf weitere ältere Probanden der EG zu. Aus der Simulatorforschung ist bekannt, dass Symptome der Unverträglichkeit häufiger bei älteren Probanden auftreten (BEHRANG et al., 2018). Zudem war das Verkehrsgeschehen auf der Teststrecke am komplexesten und die Strecke an sich am längsten, was wiederum das Auftreten von Symptomen der Simulatorkrankheit begünstigt (STONER et al., 2011). Schließlich ist es wahrscheinlich, dass die Symptomatik über die Übungsfahrten kumulierte bis hin zum Abbruch bei der Testfahrt.

Die Symptome der Simulatorkrankheit lassen sich nach dem Simulator Sickness-Questionnaires den Faktoren Übelkeit, Okulomotorik und Desorientierung zuordnen. Bei den Drop-Outs der EG haben im Verlaufe der drei Erhebungszeitpunkte (pre/inter/post) vor allem die Symptome Allg. Unwohlsein, Übelkeit, unangenehmes Magengefühl, Schwitzen und Aufstoßen des Faktors Übelkeit sowie Erschöpfung, Überreizung, Kopfschmerzen und Konzentrationsstörungen des Faktors Okulomotorik deutlich zugenommen. Insbesondere

bei der post-Erhebung wurde eine besonders hohe Symptomatik angegeben. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nur ein Teil der Drop-Outs den Fragebogen zu allen drei Erhebungszeitpunkten ausgefüllt hat, so dass das gesamte Ausmaß der Symptomatik im Selbster Urteil nicht erhoben werden konnte. Unter den Studien-Completern ließ sich anhand des Simulator Sickness-Questionnaires kein Gruppenunterschied zwischen EG und KG ausfindig machen. Auch die Einschätzung der Versuchsleiter anhand einer Ein-Item-Frage zeigt kaum Unterschiede zwischen den beiden Completer-Gruppen auf; lediglich bei der Testfahrt wird eine leicht erhöhte Unverträglichkeit bei den älteren im Vergleich zu den Probanden der KG festgestellt.

In der Literatur wird – neben dem Eingewöhnungstraining (s. Kapitel 7.3.1) – die visuelle Darstellung der virtuellen Verkehrsumgebung als ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Simulatorverträglichkeit genannt (CASSAVAUGH et al., 2011; NEUKUM & GRATZENTHALER, 2006; STONER et al., 2011). Möglicherweise könnte auch dies ein Grund für die bessere Verträglichkeit der Senioren in der Machbarkeitsstudie mit dem Pkw-Fahrsimulator (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018) sein. Während beim Pkw-Fahrsimulator die virtuelle Verkehrsumgebung über LED-Projektoren auf drei große Leinwände mit einem Sichtfeld von 180° realisiert wird, erfolgt die Darstellung beim Fahrradsimulator über 10 Großformat-Displays (relativ nah um den Fahrradsimulator herum aufgestellt) mit einem 300° Horizontal-Sichtbereich. Vereinzelt wurde von Probanden jedoch auch eine bessere Verträglichkeit der Großformat-Displays im Gegensatz zu den Leinwänden geäußert. Zur Klärung dieser Fragestellung müsste in einer gesonderten Studie ein direkter Vergleich vorgenommen werden. Interessant zu erwähnen wäre an dieser Stelle noch, dass einige – insbesondere ältere Probanden – vermisst hatten, dass das Vorderrad des Mockups nicht in der simulierten Verkehrsumgebung virtuell dargestellt wird. Zudem waren einige Probanden irritiert, dass die virtuelle Verkehrsumgebung nicht auf allen Displays scharf dargestellt wird, sondern mittels Unschärfe eine eingeschränkte Schärfentiefe am Rande des Sichtfeldes simuliert wird.

Schließlich wurde analysiert, ob sich unter den Senioren ein Zusammenhang zwischen der im Vorher-Fragebogen angegebenen Anfälligkeit für Reiseübelkeit und einem vorzeitigem Studienabbruch nachweisen lässt. Die Auswertung zeigt einen zu erwartenden Zusammenhang (mehr Anfälligkeit für Reiseübelkeit bei vorzeitigem Studienabbruch) auf, der sich statistisch allerdings aufgrund der kleinen Stichprobe nicht absichern lässt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass von allen älteren Probanden nur maximal eine geringe Anfälligkeit für Reiseübelkeit angegeben wurde. Dagegen wurde von mehreren Probanden der KG eine mittlere bis höhere Anfälligkeit für Reiseübelkeit angegeben. Zusammenfassend lassen diese Ergebnisse vermuten, dass die Anfälligkeit für Reiseübelkeit zumindest in keinem eindeutigen Zusammenhang zu einem vorzeitigem Abbruch steht, was insofern nicht verwunderlich ist, da in dieser Studie viele Abbrüche v. a. durch Adaptionsprobleme mit der Fahrdynamik erklärt werden können. Schließlich ließ sich auch kein Zusammenhang zu angegebenen gesundheitsbedingten Beeinträchtigungen und einem vorzeitigem Abbruch nachweisen.

7.3 Fahrverhalten im Fahrradsimulator

Die Probanden absolvierten drei Übungsfahrten zur Eingewöhnung, bevor sie die eigentliche Teststrecke fuhren (s. Kapitel 5.4). Die Übungsfahrten dauerten ca. 2–3 min und fanden der Reihe nach auf einer breiten Landstraße mit weitläufigen Kurven (1), auf einem Fahrradparcours zum Erlernen von Spurhaltung, Kurvenfahrt und Bremsen (2) sowie auf einer kurzen, einfachen Stadtstrecke (3) statt. Die Teststrecke (4) für die letzte Fahrt, die

ca. 7–15 min dauerte, bestand aus einem etwas komplexeren Stadtszenario. Damit waren sowohl das Eingewöhnungstraining als auch die eigentliche Testfahrt viel kürzer als bei der Machbarkeitsstudie mit dem Pkw-Fahrsimulator der BAST (SCHUMACHER & SCHUBERT, 2018), bei der ein intensives Training nach HOFFMANN und BULD (2006) an zwei verschiedenen Terminen durchgeführt wurde und auch die Testfahrt an einem dritten Termin mit ca. 60 min Fahrzeit viel umfangreicher war. Ein wichtiger Grund für die kürzeren Fahrten im Fahrradsimulator war, die körperliche Anstrengung – insbesondere für die Senioren – begrenzt zu halten.

7.3.1 Bewährung des Eingewöhnungstrainings

Es zeigte sich, dass das knappe Eingewöhnungstraining den Probanden der KG ausreichte und sie sich schnell an die Fahrdynamik des Fahrradsimulators gewöhnten. Problematisch waren nur die z. T. sehr hohen, gefahrenen Geschwindigkeiten, die allerdings auf eine nicht optimale Geschwindigkeitsumsetzung in der Simulation zurückgeführt werden. Aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeiten sowie zusätzlich einem etwas verlängertem Bremsweg kam es bei den Probanden der KG öfters zu einem unzureichendem Bremsverhalten und damit auch zu Unfällen. Obwohl die EG-Completer ebenfalls vom Eingewöhnungstraining profitierten und Fortschritte zeigten, wurde ihre Fahrperformanz von der Versuchsleitung als deutlich schwächer bewertet, insbesondere in der ersten und dritten Übungsfahrt. Weniger Gruppenunterschiede zeigten sich dagegen bei der zweiten Übungsfahrt, dem Fahrradparcours, bei dem gezielte Übungen zur Spurhaltung und Bremsen durchgeführt wurden. Vermutlich bot dieser Fahrradparcours den Probanden aufgrund der klar gekennzeichneten und begrenzten Fahrspuren in einem einfachen Setting ohne weitere Verkehrsteilnehmer eine bessere Orientierung ohne Ablenkung, von dem vor allem die Senioren profitierten. Die EG-Drop-Outs schnitten bei allen Fahrten erwartungsgemäß am schlechtesten ab, wobei dies bei der abnehmenden Stichprobenanzahl nur bedingt aussagekräftig ist. Grundsätzlich war der Fahrstil der älteren Probanden in allen vier Fahrten deutlich langsamer und störanfälliger. Insbesondere bei der ersten Übungsfahrt hat der Gegenverkehr großer landwirtschaftlicher Fahrzeuge viele ältere Probanden irritiert und kognitiv belastet bis hin zum Abkommen von der Fahrbahn. Zudem hatten viele Senioren große Probleme, die elektrische Gangschaltung zu bedienen. Besonders problematisch war, dass viele ältere Probanden eine schiefe Sitzhaltung einnahmen, die sich auch mit Unterstützung oft nicht dauerhaft korrigieren ließ. Nicht selten persistierten diese Adaptionsprobleme bis hin zur letzten Fahrt. Im Stadtverkehr kamen zusätzlich Schwierigkeiten beim Abbiegen mit Handzeichen hinzu. Insgesamt waren die genannten Schwierigkeiten bei den EG-Drop-Outs besonders stark ausgeprägt.

Die hohe Drop-Out-Rate bei den älteren Probanden aufgrund von Fahrproblemen und Symptomen der Simulatorkrankheit legt die Vermutung nahe, dass das Eingewöhnungstraining für diese spezifische Gruppe nicht ausreichend und nicht optimal zugeschnitten war. So gilt es zukünftig abzuklären, ob ein umfangreicheres Training aufgeteilt in kleine Fahreinheiten an mehreren Tagen sowie mit einem langsameren Aufbau des Schwierigkeitsgrades, die Drop-Out-Rate bei den Senioren reduzieren könnte (HOFFMANN & BULD, 2006) (s. Kapitel 7.6).

Andererseits muss berücksichtigt werden, dass einige Senioren bereits kurz nach den ersten, gefahrenen Metern die Untersuchungsfahrt abbrechen, weil sie mit der Fahrdynamik grundsätzlich nicht zurechtkamen. Dieser Punkt zielt auf die Optimierung der Fahrdynamik ab (s. Kapitel 7.4).

7.3.2 Fahrverhalten auf der Teststrecke

Bei der Fahrt auf der Teststrecke, die von 17 älteren Probanden der EG und 29 Probanden der KG bis zum Ende gefahren wurde, wurden zusätzliche Parameter erhoben, wie die mit dem Fahrradsimulator und der Software SILAB automatisch erfasste Fahrgeschwindigkeit und die von den Versuchsleitern dokumentierten Fahrfehler.

Die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit der Senioren lag deutlich unterhalb der der Probanden der KG, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei der Testfahrt überwiegend mit simulierter Pedelec-Unterstützung gefahren wurde. Dieses Ergebnis passt dazu, dass auch im realen Radverkehr ein deutlich langsames Fahrverhalten bei älteren Fahrern im Vergleich zu jüngeren beobachtet wird (POSCHADEL et al., 2012; SCHUBERT et al., 2018). Zusätzlich zu den mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten differieren auch die durchschnittlichen Maximalgeschwindigkeiten der beiden Completer-Gruppen signifikant voneinander, wobei 8 Probanden der KG sehr hohe – für ein städtisches Szenario eher unrealistische – Spitzengeschwindigkeiten von deutlich über 30 km/h erreichten.

Aufgrund des Geschwindigkeitsunterschieds der beiden Completer-Gruppen ist es plausibel, dass die Probanden der Kontrollgruppe im Selbstbericht eine höhere körperliche Anstrengung angaben als die Senioren. Zugleich haben die teilweise auch sehr hohen Spitzengeschwindigkeiten der Probanden der KG dazu beigetragen, dass es ihnen häufiger misslang, adäquat auf kritische Verkehrsszenen (z. B. bei Missachtung der Vorfahrt durch andere virtuelle Verkehrsteilnehmer) zu reagieren. Aus diesem Grund wurden bei den Probanden der KG tendenziell mehr Kollisionen und auch Vorfahrtsfehler beobachtet. Umgekehrt konnten die Senioren aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit einige unfallkritische Verkehrsszenen als solche gar nicht erleben, da sie oftmals zu spät an den kritischen Stellen eintrafen. Dies könnte mit ein Grund dafür gewesen sein, dass Fahrfehler wie Kollisionen und Vorfahrtsfehler seltener bei ihnen beobachtet wurden als bei den 25–50-jährigen. Stattdessen wurden bei den Senioren Fehler wie Spur verlassen, Falsch abgebogen und Handzeichen-Fehler etwas häufiger beobachtet. Aufgrund dieser ungleichen Testfahrtbedingungen sowie der unterschiedlichen Stichprobengrößen (wegen der hohen Ausfallquote unter den Senioren) sollten diese tendenziellen Gruppenunterschiede jedoch nur mit Vorsicht interpretiert werden. Zudem ist auffällig, dass insgesamt ungewöhnlich viele Fahrfehler (v. a. auch viele Kollisionen) beobachtet wurden, die im Realverkehr mit Sicherheit nicht in dieser Häufigkeit vorgekommen wären. Hierfür sind als Ursache Probleme mit dem Handling des Fahrradsimulators zu vermuten, von denen wahrscheinlich auch die Probanden der KG betroffen waren, wenn auch nicht so offensichtlich wie die älteren Probanden. Die erwähnten sehr hohen, erreichten Spitzengeschwindigkeiten von mehreren Probanden der KG sowie der relativ lange Bremsweg deuten auf Fehler in der Fahrdynamik hin, deren Behebung im Anschluss an diese Machbarkeitsstudie angegangen wurde (s. Kapitel 7.4). Zusammenfassend ist eher von einer begrenzten Aussagekraft der untersuchten Fahrfehler auszugehen, auch wenn die festgestellten Altersunterschiede mit Blick auf die Fahrrad-Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamtes durchaus plausibel wären. So werden bei jüngeren Radfahrern häufiger eine unangepasste Geschwindigkeit festgestellt, während bei älteren Radfahrern häufiger Fahrfehler der Kategorien Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren sowie Ein- und Anfahren ermittelt werden (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021b).

7.3.3 Selbst- vs. Fremdeinschätzung

Während die Versuchsleitung die Fahrperformanz der KG-Completer im Vergleich zu den EG-Completern bei allen vier Simulatorfahrten deutlich besser bewertete, zeichnet sich

dieser Unterschied im Selbsturteil nicht ab. So wurden das Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator, die erlebte kognitive Anstrengung und das Meistern der Fahraufgaben von beiden Completer-Gruppen im Selbsturteil ähnlich hoch eingeschätzt. Lediglich die EG-Drop-Outs gaben bzgl. des Zurechtkommens mit dem Fahrradsimulator und dem Meistern der Fahraufgaben deutlich niedrigere Werte an. Hierbei ist allerdings wieder zu berücksichtigen, dass die meisten Drop-Outs bereits vor der eigentlichen Teststrecke abbrachen und somit nur wenige ihr Fahrverhalten in Bezug auf die Teststrecke beurteilen konnten. In der vorliegenden Studie ist letztlich mangels eindeutig objektiver Daten nicht zu klären, ob bzw. inwiefern die Diskrepanz zwischen Selbst- und Fremdurteil auf eine mangelnde Selbstwahrnehmung und/oder auf einen Beobachter-Effekt im Sinne von Voreingenommenheit (Senioren fahren schlechter) zurückzuführen ist. Eine fehlende Übereinstimmung von Selbst- und Fremdurteil wurde allerdings auch in der Studie von SCHUMACHER und SCHUBERT (2018) festgestellt.

7.4 Validitätseinschätzung (Augenscheinvalidität)

Die vorliegende Machbarkeitsstudie soll erste Hinweise auf die Validität des Fahrradsimulators und der erstellten virtuellen Verkehrsumgebung aus Sicht der Probanden liefern. Hierzu wurden die Probanden während der Testfahrt befragt, wie kritisch und realistisch sie die einzelnen Verkehrsszenen erlebt hatten. Darüber hinaus wurden die Probanden nach der Testfahrt um eine Einschätzung zu verschiedenen Aspekten der Fahrdynamik, zur virtuellen Verkehrsumgebung und zur technischen Umsetzung der Simulation per Fragebogen gebeten. Die Validitätsbewertung ist dabei im Sinne einer Augenscheinvalidität zu verstehen; eine experimentelle Validitätsprüfung durch Vergleich des Radsimulators mit einer Realfahrt steht noch aus.

Nach 13 verschiedenen Verkehrsszenen wurden die Probanden gefragt, wie kritisch und wie realistisch sie die so gerade erlebte Verkehrsszene einschätzten. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass kritische Verkehrsszenen, die zeitlich so passend abgestimmt waren, dass sie die Probanden zum (scharfen) Abbremsen zwangen, als auch unangenehme Verkehrsszenen (z. B. Halten und Anfahren auf mittlerem Fahrstreifen zwischen 2 Pkw) als deutlich kritischer eingestuft wurden als Verkehrsszenen ohne erhöhtes objektives oder zumindest wahrgenommenes subjektives Risiko. Dies traf insbesondere auf Szenen zu, bei denen den Probanden die Vorfahrt genommen wurde oder ein Kind überraschend die Straße querte. Auch das enge Überholen von virtuellen Pkw-Fahrern wurde als kritisch eingestuft. Leider gelang bei der Erstellung der kritischen Verkehrsszenen die zeitliche Abstimmung auf die unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten der Probanden nicht immer optimal, so dass nicht alle Verkehrsszenen von allen Probanden als kritisch erlebt werden konnten. In zukünftigen Simulatorstudien sollte deshalb die große Variabilität der Fahrgeschwindigkeit – insbesondere die z. T. sehr langsamen Fahrgeschwindigkeiten der Senioren – besser berücksichtigt werden. Trotz dieser Umsetzungsprobleme ist jedoch festzuhalten, dass die eingebauten kritischen Verkehrsszenen in der simulierten Umgebung tatsächlich auch als kritisch erlebt wurden, obwohl den Probanden bewusst gewesen sein sollte, dass bei einer Kollision auf dem Fahrradsimulator nichts passieren kann. So war gut zu beobachten, dass einzelne Probanden sich in solchen Situationen offensichtlich erschrocken hatten. Das Eintauchen in die virtuelle Umgebung, die sog. Immersion, scheint insofern gut gelungen.

Einschränkend muss angemerkt werden, dass die Fragestellung „Wie kritisch fanden Sie gerade diese Verkehrssituationen“ nicht eindeutig formuliert war. Dies zeigte sich daran, dass mehrere Probanden die Frage nicht nur im Sinne von unfallkritisch verstanden,

sondern auch auf das Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator bezogen. Insbesondere die älteren Probanden stuften anspruchsvollere Fahrmanöver wie z. B. das Abbiegen oft als kritischer ein. Diese Zweideutigkeit der Fragestellung sollte in zukünftigen Studien bewusst vermieden werden.

Weiterhin wurde die Frage gestellt, als wie realistisch die einzelnen Verkehrsszenen erlebt wurden. Diese Frage wurde von den Probanden bei fast allen Szenen sehr positiv beantwortet. Lediglich die sehr verkehrsarmen Szenen zu Beginn der Teststrecke wurden als eher unrealistisch eingestuft.

Nach Abschluss der vier Fahrten bewerteten die Probanden zusammenfassend die Validität per Fragebogen. Bezüglich der Fahrdynamik wurde von den Probanden das Geradeausfahren als realistischer eingestuft als das Kurvenfahren, was sicherlich auch damit zusammenhängt, dass nicht mit Gewichtsverlagerung gelenkt werden kann. Insbesondere die Probanden der KG, aber auch die älteren Probanden, gaben an, sich beim Kurvenfahren viel unsicherer zu fühlen, als wenn sie real eine Kurve fahren würden. Konkret wurde kritisiert, dass die Lenkung zu sensibel reagieren würde und nach Einschätzung von Probanden mit Expertenwissen, Kreisel- und Rückstellkräfte nicht optimal simuliert seien. Korrekatives Gegenlenken führte bei mehreren Probanden zu einem Aufschaukeln von Lenkbewegungen bis hin zum Abkommen von der Fahrbahn. Weiterhin wurde das Beschleunigen als realistischer als das Bremsen empfunden. Letzteres stuften insbesondere die Probanden der KG als eher unrealistisch ein. Sie bemängelten, dass die Bremswirkung nicht stark genug sei und man noch zu lange über die Straße mit blockierten Rädern wie auf Eis gleiten würde. Relativ positiv wurde dagegen die Wirkung der Gangschaltung sowie von den Senioren die Wirkung des simulierten Elektromotorantriebs eingeschätzt. Auch das Geschwindigkeitsgefühl wurde von den Senioren relativ positiv bewertet, wohingegen die Probanden der KG angaben, dass sie das Gefühl hatten, langsamer zu fahren als die angezeigte Geschwindigkeit und die Wirkung des simulierten Elektromotorantriebs kaum wahrgenommen hätten. Tatsächlich erreichten sie jedoch vereinzelt sehr hohe Fahrgeschwindigkeiten, so dass möglicherweise das Geschwindigkeitsgefühl in der Simulation aufgrund fehlender Sinneseindrücke wie Fahrtwind und eigene Fahrgeräusche nur unzureichend übermittelt werden konnte. Zudem stellte sich im Nachhinein heraus, dass die unrealistisch hohen Spitzengeschwindigkeiten, die von einzelnen Probanden der KG erreicht wurden, auf einen Fehler in der Fahrdynamik – durch eine unzureichende Berücksichtigung des Fahrtwinds – zurückzuführen waren. Ein weiterer selten aufgetretener Fehler war das kurzzeitige Aussetzen des Rollentrainers, wenn nach dem Abbremsen in einem bestimmten zeitlichen Abstand das Pedalieren wieder aufgenommen wurde, so dass es zu einem kurzzeitigem Durchtreten kam.

Die Darstellung der virtuellen Verkehrsszenen und der anderen Verkehrsteilnehmer wurden insgesamt als sehr realistisch bewertet. Das trifft insbesondere auf die Darstellung von Häusern und Straßen zu; aus Sicht der älteren Probanden aber auch auf das Fahrverhalten von Autos, deren Geräusche sowie das Fahrverhalten der anderen Radfahrer. Im Vergleich dazu wurden die Bewegungen der virtuellen Fußgänger sowie die Umgebungsgeräusche am unrealistischsten eingeschätzt.

Der Bildfluss der Simulation und die Übertragung der eigenen Bewegungen auf die Simulation erhielten im Durchschnitt ebenfalls relativ positive Bewertungen, auch wenn zu Beginn der Studie der Operator-Rechner vereinzelt Überlastungsprobleme hatte. Die Senioren gaben zu diesem Aspekt tendenziell bessere Bewertungen ab als die Probanden der KG. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Probanden der KG möglicherweise mehr Erfahrungen mit virtuellen Welten hatten (wie z. B. aus PC-Spielen) und aufgrund dieser

Vergleichsmöglichkeiten möglicherweise kritischer urteilten als die Senioren. Abschließend bewerteten beide Completer-Gruppen die Immersion und den Realismus insgesamt als positiv.

7.5 Methodische Einschränkungen der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende (erste) Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator der BAST genügt aus mehreren Gründen nicht den strengen Vorgaben eines quasi-experimentellen Versuchsdesigns mit standardisierten Versuchsbedingungen, weshalb die Studienergebnisse nur mit Vorsicht interpretiert werden sollten. Wie im Kapitel 5.3.3 berichtet, wurden aufgrund der ersten Erfahrungen mit den Probanden Anpassungen an der Versuchsanordnung und -anleitung sowie auch am Fahrradsimulator und der Simulation vorgenommen, die zu unterschiedlichen Voraussetzungen für die Probanden geführt haben. Zusammenfassend wurden folgende Änderungen im Laufe der Studie vorgenommen: Austausch der gebrochenen Lenkführung, Behebung von vereinzelt aufgetretenen Problemen mit dem Bildfluss, Anpassung der virtuellen Horizontlinie an die Körpergröße von einzelnen Probanden, veränderter Einbezug des Elektromotors (Pedelec), zunehmend intensivere Vorwarnung der Probanden auf (irritierenden) Gegenverkehr und manuelle Korrektur der Sitzhaltung. Diese Anpassungen wurden als notwendig erachtet, damit die Probanden an der Untersuchung möglichst bis zum Ende teilnehmen konnten, da die Drop-out-Rate unter den Senioren – wie berichtet – sehr hoch war. Insofern ist es wahrscheinlich, dass ohne diese Interventionen die Drop-out-Rate möglicherweise noch höher ausgefallen wäre. Zudem ist davon auszugehen, dass die teilnehmenden Senioren mindestens durchschnittlich, wenn nicht sogar eher überdurchschnittlich fitte und kompetente Radfahrer waren (s. Kapitel 7.1). Auch aus diesem Grund könnte es sein, dass bei einer repräsentativeren Stichprobe die Ausfallquote ggf. noch höher gewesen wäre. Schließlich ist zu beachten, dass die hohe Drop-out-Rate unter den Senioren dazu geführt hat, dass die Repräsentativität der Ergebnisse aufgrund der geringen Stichprobenanzahl zum Untersuchungsende hin stark reduziert ist. Dies gilt insbesondere für die eigentliche Teststrecke, da viele ältere Probanden bereits vorher abgebrochen hatten.

Wichtige Gründe für die hohe Drop-out-Rate der Senioren waren jedoch auch Probleme mit dem Handling des Fahrradsimulators wie insbesondere in Bezug auf das Bremsen, die Lenkung sowie die Fahrgeschwindigkeit. Diese Probleme werden zum einen auf eine unzureichende Adaption der Senioren zurückgeführt, zum anderen aber auch auf zu verbessernde physikalisch-technische Aspekte der Fahrdynamik. Hier gilt es nun in zukünftigen Studien zu prüfen, ob mittels Optimierungsmaßnahmen die Drop-out-Rate unter Senioren sowie in beiden Untersuchungsgruppen die Fahrfehlerrate maßgeblich verringert werden kann. Denn für die Übertragbarkeit der Ergebnisse einer Simulatorstudie auf den Realverkehr ist es entscheidend, dass mit dem Fahrradsimulator eine ausreichend physikalisch-technische Validität sowie Verhaltensvalidität erreicht werden kann. Entsprechende Validierungsstudien mit vergleichenden Realfahrten sollten deshalb bald folgen.

Das grundsätzliche Ziel einer Machbarkeitsstudie ist es, Hinweise für Möglichkeiten und Grenzen zum Einsatz von Fahrradsimulatoren – hier mit besonderer Berücksichtigung von Senioren als Probanden – zu gewinnen sowie Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Auf Basis dieser Untersuchungserfahrungen konnte eine Reihe von hilfreichen Erkenntnissen gewonnen werden, die für die Durchführung von zukünftigen Studien sowie die Optimierung der Fahrdynamik wertvoll sein können (s. Kapitel 7.6). Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Verhaltensbeobachtung mit Fahrradsimulatoren noch überwiegend als Pionierarbeit zu verstehen, da noch grundlegende Erfahrungen zur Validität von Verhaltensbeobachtungen

mit Fahrradsimulatoren gesammelt werden müssen. Die Studie stellt deshalb bewusst ihre gesammelten Erfahrungen der Forschung zur Verfügung, einschließlich des noch zu optimierenden Eingewöhnungstrainings für Senioren sowie der hier dargestellten Anfangsprobleme mit der Fahrdynamik, um die Forschung in diesen Punkten weiter voranzubringen.

7.6 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Machbarkeitsstudie kann aufzeigen, dass Probanden einer mittleren Altersgruppe von 25–50 Jahren sich im Rahmen eines kurzen Eingewöhnungstrainings (3 Übungseinheiten à 2–3 Minuten) relativ gut an den Fahrradsimulator gewöhnen können. Die Verträglichkeit des Fahrradsimulators kann ebenfalls als gut bezeichnet werden und viele Fahraufgaben wurden von den Probanden der Kontrollgruppe fehlerarm gemeistert. Eine Ausnahme stellen hierbei die ungewöhnlich vielen beobachteten Kollisionen und Vorfahrtsfehler bei den Probanden der KG dar, die letztlich auf Fehler in der Fahrdynamik (vereinzelt unrealistisch hohe Spitzengeschwindigkeiten, zu langer Bremsweg) zurückgeführt werden.

Ein anderes Bild zeichnet sich dagegen bei den älteren Probanden im Seniorenalter ab: Hier gelang die Eingewöhnung an den Fahrradsimulator in vielen Fällen nicht ausreichend und so ist eine hohe Drop-out-Rate aufgrund von Problemen mit dem Handling des Fahrradsimulators und/oder Symptomen der Simulatorkrankheit zu verzeichnen. Bis auf das Alter können in dieser Studie keine wirklich bedeutsamen Faktoren herausgestellt werden, die mit einem vorzeitigen Abbrucheindeutig zusammenhängen, wie z. B. die Anfälligkeit für Reiseübelkeit (nur tendenzieller Zusammenhang) oder gesundheitsbedingte Beeinträchtigungen. Lediglich der etwas geringere Anteil an simulatorerfahrenen Probanden (aus früheren Studien mit dem Pkw-Fahrsimulator) der EG im Vergleich zur KG könnte sich ggf. systematisch, wenn auch nur leicht auf die Verträglichkeit ausgewirkt haben.

Da insbesondere ältere Senioren ab einem Alter von 75 Jahren und älter die Studienteilnahme vorzeitig abbrechen mussten (Drop-out-Rate: 72,7 %), wird für zukünftige Fahrradsimulator-Studien mit Senioren empfohlen, sich zunächst auf die Gruppe der jüngeren Senioren zu konzentrieren. Hier werden auf Basis der bisherigen Erfahrungen v. a. zwei grundlegende Ansätze gesehen, um möglicherweise die Adaption an den Fahrradsimulator zu verbessern und die Drop-out-Rate (41,7 %) von 65–74-jährigen Probanden zu verringern:

(1) Optimierung des Eingewöhnungstrainings für Senioren

Für zukünftige Studien gilt es zu überprüfen, ob ein umfangreicheres Eingewöhnungstraining mit einem langsameren und systematischeren Aufbau der zu erlernenden Fahrfähigkeiten und des Schwierigkeitsgrades die Adaption der Senioren an die Fahrdynamik des Fahrradsimulators verbessern kann. So empfehlen HOFFMANN und BULD (2006) ein umfangreiches Training aufgeteilt in kleine Fahreinheiten an mehreren Tagen. Im Vergleich zum Pkw-Fahrsimulator-Training muss jedoch die körperliche Anstrengung, die mit dem Fahrradfahren verbunden ist, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sollte die Länge und die Anzahl der Übungseinheiten pro Trainingstag begrenzt werden. Auf Basis der vorliegenden Studie erschienen pro Tag drei Übungseinheiten von jeweils 2–3 Minuten sowie eine abschließende Testfahrt von ca. 10–15 min mit ausreichender, individuell angepasster Pausenzeit dazwischen auch für Senioren zumindest körperlich gut zumutbar. Da bei der Testfahrt jedoch vermehrt Unverträglichkeitsprobleme auftraten, müsste nun geprüft werden, ob ein umfangreicheres, vorausgehendes Training bereits ausreicht, um die Ver-

träglichkeit zu verbessern. Es könnte jedoch auch sein, dass die Länge der Teststrecke und/oder deren Komplexität zusätzlich reduziert werden müsste.

Ein weiterer Punkt betrifft die Abfolge der Trainingsstrecken. Besonders bewährt haben sich die Übungen im Fahrradparcours ohne zusätzliche Belastung durch weitere virtuelle Verkehrsteilnehmer, weshalb sich solche Übungsstrecken für den Einstieg in das Simulatortraining empfehlen. Die im Fahrradparcours eingezeichnete, farbliche Markierung der einzuhaltenden Fahrspur, die nach und nach schmaler gestaltet werden kann, liefert gemäß den hier gemachten Erfahrungen eine gute Orientierung und verbessert somit die Spurlage. Das Kurvenfahren mit zunächst sehr weitläufigen Kurven wurde von den älteren Probanden ebenfalls gut angenommen. Weiterhin ist empfehlenswert, nach und nach das Abbiegen mit Handzeichen zu üben sowie das zusätzliche Berücksichtigen weiterer Verkehrsregeln. Aufgrund von Handhabungsproblemen mit der elektrischen Gangschaltung sollten die Probanden im Eingewöhnungstraining auf einer geraden Strecke ausreichend das Gangeschalten üben können. Auch das Bremsen und Anfahren sollte gezielt und umfangreich trainiert werden, wobei insbesondere beim Bremsen auf das richtige Maß geachtet werden muss, da häufiges und abruptes Bremsen zu Unverträglichkeit führen kann (STONER et al., 2011).

(2) Optimierung der Fahrdynamik, zukünftige Validierung mit Realfahrten

Mit einem Fahrradsimulator wird es voraussichtlich nie möglich sein, vollkommen realitätsgetreu das Fahrradfahren abbilden zu können. Dennoch gilt es für die Übertragbarkeit der Ergebnisse, an das reale Fahrradfahren so nah wie möglich heranzukommen. Auch wenn die 25–50-jährigen Probanden sich in dieser Machbarkeitsstudie schnell an die Fahrdynamik des Fahrradsimulators gewöhnen konnten, wurde auch von ihnen bemängelt, dass insbesondere das Lenken, das Bremsen und das Geschwindigkeitserleben sich deutlich vom realen Fahrradfahren unterscheidet, so dass nicht nur von einer eingeschränkten technisch-physikalischen Validität des Fahrradsimulators ausgegangen werden muss, sondern auch von einer begrenzten Verhaltensvalidität bzw. psychologischen Validität. Positiv hervorzuheben ist allerdings, dass die gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit der bei Realfahrten gemessenen Fahrgeschwindigkeit mit Pedelects zu entsprechen scheint. So wurden in der naturalistischen Fahrradstudie von SCHLEINITZ et al. (2014) bei den Pedelect-Fahrten vergleichbare, altersabhängige Geschwindigkeiten gemessen: durchschnittlich 20,4 km/h im Alter von bis zu 40 Jahre; 17,5 km/h im Alter von 41–64 Jahre und 14,8 km/h im Alter von ≥ 65 Jahre.

Bei älteren Probanden war besonders problematisch, dass einige Probanden aufgrund massiver Adaptionsprobleme bereits nach kürzester Zeit abbrechen mussten, so dass möglicherweise auch ein umfangreicheres Eingewöhnungstraining nicht ausreichend sein könnte, um ein vorzeitiges Abbrechen zu verhindern.

Aufgrund der genannten Probleme wurde im Anschluss an die hier beschriebene Studie damit begonnen, mehrere Aspekte der Fahrdynamik anzupassen, die es in zukünftigen Studien mit Probanden zu testen, weiter zu optimieren und zu validieren gilt:

(a) Verbesserung des Lenkens

Vielfach wurde von den Probanden bemängelt, dass die Lenkung zu sensitiv reagieren würde und Kreisel- und Rückstellkräfte nicht optimal simuliert seien. Diesem Problem wurde zum einen softwareseitig durch eine angepasste Übertragung des Lenkwinkels begegnet. Zum anderen wurde der bisherige Lenker durch einen Mountainbike-Lenker ausgetauscht, der zu einer stärkeren Gewichtsverlagerung nach vorne auf den Lenker und damit zu weniger ruckartigen Lenkbewegungen beitragen soll. Zukünftig könnte zudem noch die Wir-

kung der passiv-dynamischen Bodenplatte überprüft werden, die nicht gewichtsabhängig regulierbar ist und möglicherweise zur schiefen Sitzhaltung einiger Probanden beigetragen haben könnte. Eine Lenkung mit Gewichtsverlagerung ist jedoch mit diesem statischen Fahrradsimulator nicht möglich. Ob ein dynamischer Fahrradsimulator auf einem hydraulischen Hexapoden ein realitätsgetreueres Kurvenfahren ermöglichen würde, so wie es eine erste Untersuchung mit einem Motorrad Simulator zeigte (HAMMER et al., 2020), könnte ebenfalls Gegenstand zukünftiger Entwicklungen und Untersuchungen sein. Fraglich ist dabei, welchen Einfluss ein dynamischer Fahrradsimulator auf die Verträglichkeit hätte, und inwiefern die Dynamik die Adaptionfähigkeit und -schnelligkeit – insbesondere von Senioren – verändern würde. Möglicherweise könnte ein dynamischer Fahrradsimulator wie bei der Motorrad Simulatorstudie mit einem höheren Belastungsgrad im Vergleich zu einem statischen Simulator einhergehen.

(b) Verbesserung des Bremsens

Die Wirkung des Bremsens auf die Simulation wurde nach der Studie ebenfalls softwareseitig angepasst, um das gefühlte Gleiten wie auf Eis zu beheben. Zusätzlich wird überprüft, inwiefern eine akustische Rückmeldung der Fahrgeräusche ein realistischeres Bremsgefühl unterstützen kann.

(c) Verbesserung der Fahrgeschwindigkeit sowie der Wirkung der Pedelec-Funktion

Einzelne Probanden der KG hatten in der Untersuchung für ein städtisches Szenario unrealistisch hohe Spitzengeschwindigkeiten erreicht. Zudem wurde die Wirkung der Pedelec-Funktion von einigen Probanden als kaum spürbar bewertet. Eine entsprechende Anpassung der Fahrdynamik (z. B. durch eine optimierte Berücksichtigung des Fahrtwinds) wurden in der Software bereits vorgenommen, die zukünftig noch tiefergehend getestet werden muss. Weiterhin wird versucht, mit Fahrgeräuschen sowie Fahrtwind ein verbessertes Geschwindigkeitserleben zu erzeugen.

(d) Umgang mit Ausfällen des Rollentrainers

Die zurzeit bei Fahrradsimulatoren verwendeten Rollentrainer stammen i. d. R. aus dem sportlichen Fahrradtrainingsbereich und dienen v. a. dem Ausdauertraining. Aus diesem Grund sind sie nicht auf die Funktionsweise von Bremsmanövern optimiert. In der vorliegenden Studie hatte sich gezeigt, dass es in bestimmten, seltenen Fällen nach einem Bremsvorgang beim Wiederanfahren zu einem Ausfall des Rollentrainers kam, der kurzfristig keinen Widerstand erzeugte. Dies wiederum führte dazu, dass die Probanden bei der erneuten Geschwindigkeitsaufnahme kurzzeitig beim Pedalieren durchtraten. Dieses Problem konnte durch eine softwareseitige Optimierung der Fahrdynamik sowie eine Anpassung des Bremssystems des Fahrradsimulators weitestgehend behoben werden. Unter welchen Umständen es weiterhin zu Ausfällen des Rollentrainers kommt, ist Gegenstand aktueller Überprüfungen.

Zusammenfassend finden sich für viele der genannten Probleme Lösungen oder Lösungsansätze, die der Weiterentwicklung und Optimierung des Fahrradsimulators zu einer realitätsgetreueren Fahrdynamik dienen können. Diese gilt es in zukünftigen Studien zu prüfen und weiter zu optimieren. Wichtig für die zukünftige Fahrradsimulatorforschung ist schließlich die Durchführung von Validierungsstudien, bei denen die physikalisch-technische Validität, die Verhaltensvalidität inklusive psychologischer Aspekte (z. B. Belastung, Beanspruchung, Wahrnehmung) durch Vergleiche zum realen Fahrradfahren analysiert werden. Darüber hinaus wäre es auch denkbar, verschiedene Fahrradsimulatoren vergleichend gegenüberzustellen. Denn wie aus der Pkw- und Motorrad Simulatorforschung bekannt, eignen sich nicht alle Simulatoren für alle zu untersuchenden Aspekte gleicher-

maßen gut. Deshalb muss geprüft werden, welcher Aspekt mit welchem Fahrradsimulator ausreichend valide untersucht werden kann.

Positiv in diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Immersion mit dem Fahrradsimulator gut zu gelingen scheint, da kritische Verkehrsszenen auch als kritisch empfunden wurden und die Probanden erwartungsgemäß reagierten. Aus diesem Grund könnte in zukünftigen Studien der Fokus gezielt auf psychologische Aspekte wie z. B. die subjektive Sicherheit gesetzt werden. Hier bietet sich ein weites Forschungsfeld an, das auch bereits in anderen Fahrradsimulatorprojekten aufgegriffen wurde, wie z. B. die subjektive Wahrnehmung von neuen Infrastrukturmaßnahmen sowie die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern, anderen Fahrradfahrern, motorisierten Fahrzeugen sowie auch im automatisierten und autonomen Modus fahrenden Fahrzeugen.

Schließlich können Fahrradsimulatoren auch nicht nur für Forschungszwecke genutzt werden, sondern auch für speziell ausgerichtete Verkehrstrainings. Unter der Voraussetzung, dass die Drop-out-Rate für Senioren deutlich gesenkt werden kann und sich die Validität als hinreichend gut erweist, wären mit dem Fahrradsimulator Verkehrstrainings denkbar, die auf die individuellen Bedarfe von Senioren ausgerichtet werden könnten.

Literatur

@CITY. (2018). @City: Automatisiertes Fahren in der Stadt. <https://www.atcity-online.de/>
Letzter Zugriff am 04.06.2024.

AKERSTEDT, T. & GILLBERG, M. (1990). Subjectiv. a.d objective sleppiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 59(1-2), 29–37.

BALK, S. A., BERTOLA, M. A. & INMAN, V. W. (2013). Simulator Sickness Questionnaire: Twenty Years Later. In *Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design: driving assessment 2013* (S. 257–263). University of Iowa. <https://pubs.lib.uiowa.edu/driving/article/id/28474/>.
Letzter Zugriff am 04.06.2024.

BEHRANG, K., RAMKHALAWANSINGH, R., HAYCOCK, B., SHAHAB, S. & CAMPOS, J. (2018). Comparing simulator sickness in younger and older adults during simulated driving under different multisensory conditions. *Transportation Research Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, 54, 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.01.007>

BLANA, E. (1996). *Driving Simulator Validation Studies: A Literatur Review*. Institut of Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 480.

BULD, S., HOFFMANN, S., TOTZKE, I. & KRÜGER, H.-P. (2006). Autobahnauffahrten in Abhängigkeit von Verkehrsdichte und -bewegung: Studie durchgeführt im Rahmen des Virtuellen Instituts „Humane Automation“. Interner Bericht, IZVW Würzburg.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). (o. D.). Safety4Bikes: Assistenzsystem für mehr Sicherheit von fahrradfahrenden Kindern. <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/safety4bikes>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.

CAIRD, J. K. & HORREY, W. J. (2011). Twelve practical and useful questions about driving simulation. In Fisher, D., L., M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. (5-1 - 5-18). CRC Press.

CASSAVAUGH, N., DOMEYER, J. & BACKS, R. (2011). Lessons learned regarding simulator sickness in older adult drivers. DOI: 10.1007/978-3-642-21666-4_29.

COHEN, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioural Sciences: Second Edition*. Lawrence Erlbaum.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2021). Inauguration of the new VRU simulator, Nov 4th, 2021. <https://virtuell.dlr.de/inauguration-of-the-new-vru-simulator-nov-4th-2021/>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.

DOROUDGAR, S., CHUANG, H. M., PERRY, P. J., THOMAS, K., BOHNER, K. & CANEDO, J. (2017). Driving performance comparing older versus younger driver. *Traffic Injury Prevention*, 18(1), 41–46.

ENGBERS, C., DUBBELDAM, R., SCHAAKE, L., HAIR, S. D., GOEDE, M. D. & BUURKE, J. (2014). Can a rear-view assistant support elderly cyclists? In *Ageing and Safe Mobility Conference*, 27-28 November 2014, Bergisch Gladbach, Germany. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrssicherheit/Downloads/U-Ageing-2014/Downloads-Papers/Engbers.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Letzter Zugriff am 04.06.2024.

EPSTEIN, S. (1979). The stability of behaviour: on predicting most of the people much of the time. *Journal of Personality and Social Psychology*, 37, Artikel 1097-1126.

- ERB, R. (2001). Zum Problem der Stabilität beim Fahrradfahren. *MNU*, 5(54), 279–284. <https://docplayer.org/21123020-Zum-problem-der-stabilitaet-beim-fahrradfahren-1-einleitung-r-erb-kassel.html>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.
- EVERS, C. (2020). Gurte, Kindersitze, Helme und Schutzkleidung - 2019. Bundesanstalt für Straßenwesen. Daten & Fakten kompakt 02/20. <https://www.bast.de/DE/Publikationen/DaFa/2020-2019/2020-02.html?nn=1497062>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.
- EVERS, C., GASTER, K., HOLTE, H., SUING, M. & SURGES, F. (2022). Nutzung von Mobiltelefonen beim Radfahren: Prävalenz, Nutzermerkmale und Gefahrenpotenziale. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 329*. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- FREY, A. (2016). Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich - Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik: Heft F 115*. Fachverlag NW.
- FRIEL, D., WACHHOLZ, S. & FRESEMANN, C. (2020). SuSi3D: Subjektive Sicherheit von Radverkehrsinfrastruktur. <https://nrvp.de/21958>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.
- FUNK, W., ROSSNAGEL, T. & MAIER, S. (2021). Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Radfahrern und Fußgängern. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 312*. Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH.
- GRANACHER, U., MUEHLBAUER, T., GSCHWIND, Y. J., PFENNINGER, B. & KRESSIG, R. W. (2014). Diagnostik und Training von Kraft und Gleichgewicht zur Sturzprävention im Alter: Empfehlungen eines interdisziplinären Expertengremiums. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 47(6), 513–526. <https://doi.org/10.1007/s00391-013-0509-5>
- HAGEMEISTER, C. & TEGEN-KLEBINGAT, A. (2011). Fahrgewohnheiten älterer Radfahrerinnen und Radfahrer. *Schriftenreihe der Eugen-Otto-Butz-Stiftung: Bd. 5*. TÜV Media.
- HAMMER, T., MERKEL, N. L., PLESS, R., WILL, S. & NEUKUM, A. (2020). Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren. Abschlussbericht zum Projekt FE 82.0700/2017 der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- HEINOVSKI, J., STRATMANN, L., BUSE, S. D., KLINGLER, F., FRANKE, M., OCZKO, M.-C. H., SOMMER, C., SCHARLAU, I. & DRESSLER, F. Modeling cycling behavior to improve bicyclists' safety at intersections – a networking perspective. In *Proceedings of 20th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2019)*, Washington, D.C., June 2019.
- Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (H-BRS). (o. D.). FIVIS - Immersiver Fahrradsimulator: Entwicklung eines Fahrradfahrsimulators zur Verkehrserziehung und zum Verkehrssicherheitstraining für verschiedene Altersklassen. <https://www.h-brs.de/de/fivis>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.
- HOFF, M. (2018). Motorische Plastizität über die Lebensspanne: Untersuchungen zur Reduktion altersbedingter feinmotorischer Defizite durch motorisches Lernen und nicht-invasiver Hirnstimulation. Dissertation. Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften. https://pure.mpg.de/rest/items/item_3005837_3/component/file_3028745/content. Letzter Zugriff am 04.06.2024.

- HOFFMANN, S. & BULD, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, VDI-Berichte, 1960*, 113–132.
- HOLTE, H. (2012). Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten und das Unfallrisiko junger Fahrerinnen und Fahrer. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 229*. Wirtschaftsverlag N.W.
- HOLTE, H. (2018). Seniorinnen und Senioren im Straßenverkehr: Bedarfsanalysen im Kontext von Lebenslagen, Lebensstilen und verkehrssicherheitsrelevanten Erwartungen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 285*. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- HOLTE, H. & ALBRECHT, M. (2004). Verkehrsteilnahme und -erleben im Straßenverkehr bei Krankheit und Medikamenteneinnahme. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 162*. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- HUEMER, A. K., ROSENBOOM, L., NAUJOKS, M. & BANACH, E. (2022). Testing infrastructure layout in virtual environments: An examination from a bicycle rider's perspective in simulation and online. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100586>.
- HUEMER, A., WILLRODT, U. G. & VOLLRATH, M. (2018). Alternative Navigationskonzepte für Radfahrer: eine Usability-Studie. In 60. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Marburg, 11.-13.03.2018.
- infas, DLR, IVT und infas 360. (2018). *Mobilität in Deutschland: Ergebnisbericht. Eine Studie von infas DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*.
- IOSA, M., FUSCO, A., MORONE, G. & PAOLUCCI, S. (2014). Development and decline of upright gait stability. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6.
- KAB, C., SCHOCH, S., NAUJOKS, F., HERGETH, S., KEINATH, A. & NEUKUM, A. (2020). A Methodological Approach to Determine the Benefits of External HMI During Interactions Between Cyclists and Automated Vehicles: A Bicycle Simulator Study. In H. Krömker (Hg.), *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Driving Behavior, Urban and Smart Mobility. HCII 2020, Copenhagen, Denmark* (S. 211–227). Springer.
- KAB, C., SCHOCH, S., NAUJOKS, F., HERGETH, S., STEMMLER, T., KEINATH, A. & NEUKUM, A. (2020). Using a Bicycle Simulator to Examine the Effects of External HMI on Behavior of Vulnerable Interaction Partners of Automated Vehicles. In *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2020 VR* (S. 157–164). <https://proceedings.driving-simulation.org/proceeding/dsc-2020/using-a-bicycle-simulator-to-examine-the-effects-of-external-hmi-on-behavior-of-vulnerable-interaction-partners-of-automated-vehicles/>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.
- KATHS, H., KELER, A., GRIGOROPOULOS, G., KRÄMER, K. & BUSCH, F. (2021). RadOnTime: Wirkungen von Restzeitanzeigen auf den Radverkehr. In T. Klein (Hg.), *Radverkehrsinfrastruktur – Baustein der Verkehrswende.: Gemeinsame Abschlusspublikation des NRVP-Forschungsbegleitkreises „Förderschwerpunkt Infrastruktur“*. Berlin 2021 (Difu-Sonderveröffentlichung) (S. 32–44).
- KATHS, H., KELER, A., GRIGOROPOULOS, G., HSSEINI, S. A. & BUSCH, F. (2021). RASCH – RAdSCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur. In T. Klein (Hg.), *Radverkehrsinfrastruktur – Baustein der Verkehrswende.: Gemeinsame Abschlusspublikation des*

NRVP-Forschungsbegleitkreises „Förderschwerpunkt Infrastruktur“. Berlin 2021 (Difu-Sonderveröffentlichung) (S. 45–52).

KELER, A., MALCOLM, P., GRIGOROPOULOS, G., HOSSEINI, S. A., KATHS, H., BUSCH, F. & BOGENBERGER, K. (2021). Data-driven scenario specification for AV–VRU interactions at urban roundabouts. DOI:10.3390/su13158281

KENNEDY, R. S., LANE, N. E., BERBAUM, K. S. & LILIENTHAL, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220.

KRÜGER, A., TÜNNERMANN, J., STRATMANN, L., BRIESE, L., DRESSLER, F. & SCHARLAU, I. (2021). TVA in the wild: Applying the theory of visual attention to game-like and less controlled experiments. *Open Psychology*, 3(1).

LEE, H. C. & LEE, A. H. (2005). Identifying older drivers at risk of traffic violations by using a driving simulator: A 3-year longitudinal study. *American Journal of Occupational Therapy*, 59, 97–100.

MAAG, C., KENNTNER-MABIALA, R., KAUSSNER, Y., HOFFMANN, S. & EBERT, S. (2021). Eignung von Fahrsimulatoren für die Untersuchung der Fahrkompetenz älterer Autofahrer. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 320*. Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH.

MORGAN, M., PHILLIPS, J. G., BRADSHAW, J. L., MATTINGLEY, J. B., IANSEK, R. & BRADSHAW, J. A. (1994). Age-related motor slowness: simply strategic? *Journal of Gerontology*, 49(3), M133-9.

NEUKUM, A. & GRATTENTHALER, H. (2006). Kinetose in der Fahrsimulation: Simulation von Einsatzfahrten im Auftrag des Präsidiums der Bayerischen Bereitschaftspolizei, Abschlussbericht – Teil II. Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg.

NITSCH, M., GIRAUX, P., COHEN, L., GERLOFF, C. & HUMMEL, F. (2007). Effekte motorkortikaler Stimulation auf motorisches Lernen im Alter: Abstracts Freier Vorträge und Poster der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neurologie (DGN), Berlin. Aktuelle Neurologie.

NOBIS, C. (2019). *Mobilität in Deutschland – MiD. Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr*. BMVI, infas, DLR, IVT, infas 360. Bonn, Berlin.

O’HERN, S., OXLEY, J. & STEVENSON, M. (2017). Validation of a bicycle simulator for road safety research. *Accident Analysis and Prevention*, 100, 53–58.

OCZKO, M.-C. H., STRATMANN, L., FRANKE, M., HEINOVSKI, J., BUSE, D. S., KLINGLER, F. & DRESSLER, F. (2020). Integrating haptic signals with V2X-based safety systems for vulnerable road users. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2020)*, Kailua, HI, February 2020 (S. 692–697).

PAGANO, R. R. (2010). *Understanding statistics in the behavioral sciences* (9th ed.). Thomson Wadsworth.

PLATHO, C., HORN, H.-P., JÄNSCH, M. & JOHANNSEN, H. (2021). Analyse der Merkmale und des Unfallgeschehens von Pedelecfahrern. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M313*. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.

- PLATHO, C., PAULENZ, A. & KOLREP-ROMETSCH, H. (2016). Wahrnehmungspsychologische Analyse der Radfahraufgabe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 267. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- POSCHADEL, S., FALKENSTEIN, M., RINKENAUER, G., MENDZHERITSKIY, G., FIMM, B., WORRINGER, B., ENGIN, T., KLEINEMAS, U. & RUDINGER, G. (2012). Verkehrssicherheitsrelevante Leistungspotenziale, Defizite und Kompensationsmöglichkeiten älterer Autofahrer. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 231. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- PURUCKER, C., STEMMLER, T., WILL, S. & NEUKUM, A. (2019). Tackling current challenges for driving simulation and human factors research. In Proceedings of the 5th Symposium Driving Simulation. Aachen, 20.-21.11.2019.
- RANGELOVA, S., REHM, K., DIEFENBACH, S., MOTUS, D. & ANDRÉ, E. (2020). Gender Differences in Simulation Sickness in Static vs. Moving Platform VR Automated Driving Simulation. In H. Krömker (Hg.), HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Automated Driving and In-Vehicle Experience Design. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12212. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50523-3_11
- REINHARD, R., RUTRECHT, H. M., HENGSTENBERG, P., TUTULMAZ, E., GEISLER, B., HECHT, H. & MUTTRAY, A. (2017). The best way to assess visually induced motion sickness in a fixed-base driving simulator. Transportation Research Part F, Traffic psychology and behaviour, 48, 74–88.
- RUDISILL, T. M., ZHU, M., KELLEY, G. A., PILKER, C. & RUDISILL, B. R. (2016). Medication use and the risk of motor vehicle collisions among licensed drivers: A systematic review. Accident Analysis and Prevention, 96, 255–270.
- SALKIND, N. J. (2010). Encyclopedia of Research Design. Sage.
- SAVINO, G. L., SAWITZKY, T. von, MATVIHENKO, A., STURDEE, M., WOŹNIAK, P. W., LÖCHTEFELD, M., KUN, A. L., RIENER, A. & HÄKKILÄ, J. (2021). Cycling@CHI Towards a Research Agenda for HCI in the Bike Lane InCHI. In Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, May 8-13, 2021. <https://doi.org/10.1145/3411763.3441316>
- SAWITZKY, T. von, GRAUSCHOPF, T. & RIENER, A. (2020). No need to slow down! A head up display based warning system for cyclists for safe passage of parked vehicles. In 12th International Conference (S. 1–3). <https://doi.org/10.1145/3409251.3411708>
- SAWITZKY, T. von, WINTERSBERGER, P., LÖCKEN, A., FRISON, A.-K. & RIENER, A. (2020). Augmentation concepts with HUDs for cyclists to improve road safety in shared spaces. In Extended abstracts of the CHI Conference on human factors in computing systems, 2020 (S. 1–9). <https://doi.org/10.1145/3334480.3383022>
- SCHLEINITZ, K., FRANKE-BARTHOLDT, L., PETZOLDT, T., SCHWANITZ, S., GEHLERT, T. & KÜHN, M. (2014). Pedelec-naturalistic cycling study. Forschungsbericht/Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V: Nr. 27. GDV.
- SCHLEINITZ, K., PETZOLDT, T., FRANKE-BARTHOLDT, L., KREMS, J. F. & GEHLERT, T. (2015). Conflict partners and infrastructure use in safety critical events in cycling – Results from a naturalistic cycling study. Transportation Research Part F, Traffic Psychology and Behaviour, 31(2), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.002>

- SCHLENDER, D. (2008). Simulatorkrankheit in Fahrsimulatoren. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 54(2), 74–80.
- SCHLICHTING, H. J. (1984). Zur Gleichgewichtsproblematik beim Fahrradfahren. *technic-didact*(9/4), Artikel 257, 1–5.
- SCHÖMIG, N., SCHOCH, S., NEUKUM, A., SCHUMACHER, M. & WANDTNER, B. (2015). Simulatorstudien zur Ablenkungswirkung fahrfremder Tätigkeiten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 253. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- SCHUBERT, K., GRÄCMANN, N. & BARTMANN, A. (2018). Demografischer Wandel - Kenntnisstand und Maßnahmenempfehlungen zur Sicherung der Mobilität älterer Verkehrsteilnehmer. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 283. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- SCHUMACHER, M. & SCHUBERT, K. (2018). Fahrverhaltensbeobachtung mit Senioren im Fahrsimulator der BAST - Machbarkeitsstudie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: M 282. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- SHERIDAN, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 120–125. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>
- SHOMAN, M. & IMINE, H. (2020). Subjective validity of bicycle simulators. In A. Suzuki, Y. He & P. Thulasiraman (Hg.), *VEHICULAR 2020: The Ninth International Conference on Advances in Vehicular Systems, Technologies and Applications* : October 18-22, 2020 (S. 72–77). IARIA.
- SOLESIO-JOFRE, E., SERBRUYNS, L., WOOLLEY, D. G., MANTINI, D., BEETS, I. A. & SWINNEN, S. P. (2014). Aging effects on the resting state motor network and interlimb coordination. *Hum Brain Mapp*, 35, 3945–3961.
- Statistisches Bundesamt. (2020). Verkehrsunfälle - Unfälle von Senioren im Straßenverkehr 2019.
- Statistisches Bundesamt (2021a). Verkehrsunfälle - Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2020.
- Statistisches Bundesamt (2021b). Verkehrsunfälle - Unfälle von Senioren im Straßenverkehr 2020.
- STEFFENS, U., PFEIFFER, K. & SCHREIBER, N. (1999). Ältere Menschen als Radfahrer. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit: Heft M 112. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- STONER, H. A., FISHER, D. L. & MOLLENHAUER, M. (2011). Simulator and scenario factors influencing simulator sickness. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. (14.1-14.24). CRC Press.
- TH Nürnberg. (2021). Virtual Reality für mehr Zufußgehen und Radfahren: Forschungsprojekt der TH Nürnberg unterstützt die Förderung des Fußgänger- und Radverkehrs. <https://www.th-nuernberg.de/pressemitteilung/4226-virtual-reality-fuer-mehr/>. Letzter Zugriff am 04.06.2024

TRICK, L. & CAIRD, J. (2011). Methodological issues when conducting research on older drivers. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hg.), Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology. (26.1-26.13). CRC Press.

VON BELOW, A. (2016). Verkehrssicherheit von Radfahrern: Analyse sicherheitsrelevanter Motive, Einstellungen und Verhaltensweisen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit: Heft 264. Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.

WELLER, G., SCHLAG, B. & GEHLERT, T. (2015). Does older driver's psychophysical fitness predicts their driving performance? https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrssicherheit/Downloads/U-Ageing-2014/Downloads-Papers/Weller.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Letzter Zugriff am 05.06.2024.

WILCOX, R. R. (2012). Introduction to robust estimation and hypothesis testing: Statistical modeling and decision science (3rd ed.). Academic Press.

WITTENBERG, R., CRAMER, H. C. & VICARI, B. (2014). Datenanalyse mit IBM SPSS Statistics. Eine syntaxorientierte Einführung. UVK Verlagsgesellschaft.

WÖSSNER, U., OBST, T., DEMBSKI, F., ZEILE, P., DRESCHER, J. & ELLENBECK, S. (2022). Das Projekt: CapeReviso. Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS). <https://capereviso.hlrs.de/das-projekt/>. Letzter Zugriff am 04.06.2024.

Bilder

Bild 1:	Fahrrad-Mockup	25
Bild 2:	Fahrrad-Simulator-Labor	25
Bild 3:	Vorderrad auf dem Lenklager	26
Bild 4:	Hinterrad an der Widerstandseinheit des Aktuators.....	26
Bild 5:	Lenkertaster zur Pedelec-Simulation (links) und für die elektronische 11-Gang-Schaltung (rechts)	27
Bild 6:	Multifunktionsdisplay, mittig am Lenker angebracht	27
Bild 7:	Versuchsablauf	28
Bild 8:	Erste Übungsstrecke (Landstrecke)	32
Bild 9:	Zweite Übungsstrecke (Fahrradparcours).....	32
Bild 10:	Zweite Übungsstrecke (Streckenabschnitt A) „Spurhaltung breite, gerade Strecke“	33
Bild 11:	Dritte Übungsfahrt (Kurze Stadtstrecke).....	33
Bild 12:	Streckenabschnitt 6 – Kind quert plötzlich die Straße.....	35
Bild 13:	Streckenabschnitt 11 – Fahrradfahrerin fährt sehr langsam vor Probanden, zugleich überholender Pkw-Verkehr	35
Bild 14:	Streckenabschnitt 13 – Zwei aufeinanderfolgende Kreuzungen, ein Pkw schneidet den Probanden.....	36
Bild 15:	Streckenabschnitt 15 – Halt zwischen zwei Pkw an einer Lichtsignalanlage bei Rot	36
Bild 16:	Streckenabschnitt 17 – Lieferfahrzeug (von der Post) kommt von rechts überraschend aus einem Seitenweg heraus und fährt auf die rot markierte Radfurt	36
Bild 17:	Antwortskala zur Einschätzung der Verkehrsszene mittig am Lenker	41
Bild 18:	Geschlechtsverteilung	43
Bild 19:	Vorher-Fragebogen – Typische Fahrtwege	45
Bild 20:	Vorher-Fragebogen – Bevorzugte Fahrgeschwindigkeit	46
Bild 21:	Vorher-Fragebogen – Handlungskompetenzerwartung: Zutrauen von bestimmten Verkehrssituationen.....	47
Bild 22:	Vorher-Fragebogen – Riskantes Fahrverhalten und kritische Verkehrssitu- ationen	48
Bild 23:	Drop-out-Rate – EG vs. KG	51
Bild 24:	Drop-out-Rate – Jüngere vs. ältere Senioren.....	51
Bild 25:	Drop-outs – Zeitpunkt des Abbruchs.....	52

Bild 26:	Drop-Out-Rate in Abhängigkeit der Vorerfahrungen mit dem Pkw-Fahrsimulator	52
Bild 27:	Anteil der Probanden mit und ohne Simulatorerfahrung in den beiden Completer-Gruppen	53
Bild 28:	Simulatorkrankheit – Faktor I Übelkeit in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil).....	55
Bild 29:	Simulatorkrankheit – Faktor II Okulomotorik in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)	55
Bild 30:	Simulatorkrankheit – Faktor III Desorientierung in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)	55
Bild 31:	Simulatorkrankheit – Symptome auf Itemebene der EG-Drop-outs in Abhängigkeit der Erhebungsphase (Selbsturteil)	56
Bild 32:	Anzeichen von Unverträglichkeit (Fremdurteil).....	56
Bild 33:	Einschätzung der Fahrperformanz (Fremdurteil)	57
Bild 34:	Bewährung der Übungs- und Teststrecken (Fremdurteil).....	59
Bild 35:	Zurechtkommen mit dem Fahrradsimulator (Selbsturteil)	60
Bild 36:	Erlebte körperliche Anstrengung (Selbsturteil)	60
Bild 37:	Erlebte kognitive Anstrengung (Selbsturteil)	61
Bild 38:	Fahraufgaben bzw. Herausforderungen im Stadtverkehr meistern (Selbsturteil) ..	61
Bild 39:	Einschätzung, wie kritisch die Verkehrsszene erlebt wurde (Selbsturteil).....	65
Bild 40:	Einschätzung, wie realistisch die Verkehrsszene erlebt wurde (Selbsturteil)	65
Bild 41:	Erleben der Fahrdynamik (Selbsturteil)	66
Bild 42:	Erleben der Verkehrsszenarien und anderer Verkehrsteilnehmer (Selbsturteil) ..	67
Bild 43:	Erleben der technischen Umsetzung (Selbsturteil)	67
Bild 44:	Fahrverhalten im Vergleich zu Realfahrten.....	68
Bild 45:	Abschließende Gesamtbewertung (Selbsturteil).....	68

Tabellen

Tab. 1:	Altersbedingte Leistungsveränderungen und ihre mögliche Auswirkung auf fahrrelevante Fähigkeiten.....	14
Tab. 2:	Fahrradsimulatoren in Deutschland – Aktuelle Forschungsthemen und -projekte	22
Tab. 3:	Vorher-Fragebogen – Häufigkeit von gefahrenen Streckenlängen und -umgebungen	46
Tab. 4:	Vorher-Fragebogen – Meiden widriger Fahrbedingungen (Risikowahrnehmung)	48
Tab. 5:	Schwerpunktthemen der drei Übungsfahrten	58

Anhang

Übersicht

- Anhang I: Vorher-Fragebogen (Selbsturteil, pre)
- Anhang II: Kurz-Fragebogen (Selbsturteil, intra)
- Anhang III: Abschluss-Fragebogen (Selbsturteil, post)
- Anhang IV: Dokumentationsbogen Versuchsleitung (Fremdurteil, intra)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Mensch und Sicherheit“

2022

- M 322: Influencer in der Verkehrssicherheitskommunikation: Konzeptentwicklung und pilothafte Anwendung**
Duckwitz, Funk, Hielscher, Schröder, Schrauth, Seegers, Kraft, Geib, Fischer, Schnabel, Veigl € 19,50
- M 324: Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse und Bewertung von Radverkehrsunfällen**
Baier, Cekic, Engelen, Baier, Jürgensohn, Platho, Hamacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 325: Eignung der Fahrsimulation zur Beurteilung der Fahrsicherheit bei Tagesschläfrigkeit**
Kenntner-Mabiala, Ebert, Wörle, Pearson, Metz, Kaussner, Hargutt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 326: Kinderunfallatlas 2015–2019**
Suing, Auerbach, Färber, Treichel € 22,50
- M 327: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen 2019**
Gruschwitz, Pirsig, Hölscher, Hoß, Woopen, Schulte € 17,50
- M 328: Evaluation des Carsharinggesetzes**
Kurte, Esser, Wittowsky, Groth, Garde, Helmrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 329: Nutzung von Mobiltelefonen beim Radfahren – Prävalenz, Nutzermerkmale und Gefahrenpotenziale**
Evers, Gaster, Holte, Suing, Surges € 17,50
- M 330: Ausbildungs- und Evaluationskonzept zur Optimierung der Fahrausbildung in Deutschland**
Sturzbecher, Brünken, Bredow, Genschow, Ewald, Klüver, Thüs, Malone
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 331: E-Learning Unterrichtskonzepte für die Fahranfängervorbereitung**
Hilz, Malone, Brünken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 332: Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten**
Helmer, Trampert, Schiefer, Ungewiß, Baumann, Feßler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 333: Expertise zum Projektbericht VALOR**
Link
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023

- M 334: Unfallbeteiligung von Wohnmobilen 2010 bis 2020**
Färber, Pöppel-Decker, Schönebeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 335: Evaluation der Kampagne „Runter vom Gas!“ 2016-2019**
Petersen, Vollbracht
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 336: Die Entwicklung verkehrssicherheitsrelevanter Personenmerkmale im höheren Lebensalter und ihre Einflussfaktoren – Erste Querschnittsanalysen aus der Dortmunder-Bonner-Längsschnittstudie (DoBoLSiS)**
Karthaus, Getzmann, Wascher, Graas, Rudinger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 337: Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der experimentellen Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung

Platho, Tristram, Kupschick

€ 17,00

M 338: Influencer in der Verkehrssicherheitskommunikation: Geschäftsmodelle und Kooperationsformen

Zabel, Duckwitz, Funk, Myshkina

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 339: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen 2021

Gruschwitz, Hölscher, van Nek, Busch, Wooten

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 340: Erweiterung der Erfassung vertiefter Verkehrsunfalldaten um psychologische und medizinische Langzeitfolgen

Jänsch, Sperlich, Unruh, Johannsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 341: Key Performance Indicator „Alkohol“ – Entwicklung einer Methodik und Ersterhebung

Schrauth, Funk, Behnke, Beug, Jung, Schiller, Schulte

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 342: Vertiefende Analyse des Unfallgeschehens älterer Fahrzeugführender

Strauzenberg, Pohle

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

2024

M 343: Kommunikationsmaßnahmen zur Verbesserung der Radverkehrssicherheit

Manz, Müller, Engel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 344: Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones durch Pkw-Fahrer, Radfahrer und Fußgänger 2022

Maier, Funk, La Guardia, Pušica, Kathmann, Agorastos, Bickel, Deyerl, Fischer, Jung, Kuhlmann, Metz, Panowitz, Lahanas, Schiller, Schulleri, Johannsen, Kocak, Krauhausen, Scharrenbroich, Stöver

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 345: Analyse des Leistungsniveaus im Rettungsdienst für die Jahre 2020 und 2021

Schütte, Fürst, Szyprons, Schmitz, Weber, Käser, Harder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 346: Alternative Antriebstechnologien: Marktdurchdringung und Konsequenzen für die Straßenverkehrssicherheit – Berichtszeitraum 2019-2021

Pöppel-Decker, Bierbach, Piasecki, Schönebeck

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

M 347: Machbarkeitsstudie zum Fahrradsimulator mit besonderer Berücksichtigung von Senioren als Radfahrer

Suing

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9315
ISBN 978-3-95606-791-4
<https://doi.org/10.60850/bericht-m347>

www.bast.de