

# Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Mensch und Sicherheit Heft M 323

**bast**

# Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren

von

Thomas Hammer  
Raphael Pleß  
Sebastian Will  
Alexandra Neukum

Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH  
Veitshöchheim

Nora Leona Merkel

Fachgebiet Fahrzeugtechnik  
TU Darmstadt

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Mensch und Sicherheit Heft M 323**

**bast**

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.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 82.0700**  
Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren

**Fachbetreuung**  
Fabian Surges

**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

**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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9315  
ISBN 978-3-95606-651-1

Bergisch Gladbach, Dezember 2021

---

## Kurzfassung – Abstract

### Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren

Im Pkw-Sektor wird bereits eine Vielzahl sicherheitsrelevanter Forschungsfragen mit Hilfe von Fahrsimulatoren untersucht. Zudem liegen viele Studien zur Übertragbarkeit der in Simulatoren gewonnenen Erkenntnisse auf den realen Straßenverkehr vor. Im Vergleich dazu befindet sich der Einsatz der Motorradsimulation in einem sehr frühen Stadium. Die langjährigen Erfahrungen im Pkw-Sektor zeigen, dass Fahrsimulatoren einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten können. Dieses Potenzial gilt es für Motorradsimulatoren ebenfalls zu überprüfen.

Motorradsimulatoren – insbesondere mit einem komplexen technischen Aufbau für Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen – wurden bislang nur in sehr wenigen Forschungseinrichtungen aufgebaut. Wissenschaftliche Studien zur Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit der mit Motorradsimulatoren erzielten Ergebnisse liegen kaum vor. Darüber hinaus ist nicht geklärt, welche Ausbaustufen der Motorradsimulation für die Beantwortung spezifischer Fragestellungen hinreichend oder notwendig sind. Dies stellt insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Zahl schwerer und tödlicher Unfälle von Motorradfahren ein erhebliches Defizit dar (DESTATIS; 2020a). Die Durchführung sicherheitsrelevanter Studien an Motorradsimulatoren könnte – wie im Pkw-Bereich auch – als wichtiges Werkzeug zur gefahrlosen und effizienten Untersuchung z.B. von eingreifenden Assistenzsystemen wie automatischen Notbrems- oder Ausweichsystemen beitragen, oder als gefahrenfreies Werkzeug für Fahrtrainings genutzt werden und damit einen positiven Effekt auf die Sicherheit von Motorradfahrern haben. Um sich diesem Ziel zu nähern, müssen jedoch Erkenntnisse hinsichtlich der Eignung von Motorradsimulatoren vorliegen.

Entsprechend verfolgt das vorliegende Projekt zwei Ziele: Erstens sollen Erkenntnisse über Einsatzmöglichkeiten von Motorradsimulatoren unterschiedlicher Ausbaustufen generiert werden. Daraus soll eine Entscheidungshilfe erarbeitet werden, die Anwendern aufzeigt, bei welcher Art von Fragestellung Motorradsimulatoren (in unterschiedlichen Ausbaustufen) eingesetzt werden können. Zweitens soll im Rahmen des Projekts eine Methodik zur Validierung von Motorradsimulatoren entwickelt werden, die mit einer definierten Anzahl an Untersuchungen Aussagen hinsichtlich der Validität für die im ersten Teil ermittelten Einsatzmöglichkeiten erlauben soll.

Kern der entwickelten Methodik ist die Annahme, dass sich komplexe Fahraufgaben in kleinere, fahrhandlungsunterscheidende Einheiten, die sogenannten Minimalszenarien, unterteilen lassen. Hierbei handelt es sich um Aufgaben wie beispielsweise Anfahren aus dem Stand, Einleiten einer Kurve mit konstanter Geschwindigkeit oder Bremsung in den Stand. Des Weiteren wird angenommen, dass sich Minimalszenarien im Nachgang zu komplexen Fahraufgaben zusammenführen lassen. Hierdurch soll die Vielzahl möglicher Anwendungsfelder auf den kleinsten Satz gemeinsamer elementarer Aufgaben gebracht werden, um den Validierungsaufwand zu reduzieren.

Um neben dem Vergleich zwischen Realfahrzeug und Motorradsimulation eine erste Abschätzung hinsichtlich der benötigten Ausbaustufe eines Simulators treffen zu können, wurde die Untersuchung mit einem Messmotorrad des Typs Honda NC 700 X, dem dynamischen „DESMORI“ Motorradsimulator und dem statischen Motorradsimulator der WIVW GmbH durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Zur umfassenden Betrachtung wurden neben fahrdynamischen Parametern Kenngrößen zum Fahrerverhalten sowie der messbaren und subjektiv erlebten Beanspruchung einbezogen.

Auf Basis einer großen Anzahl potenzieller Anwendungsfelder wurden Minimalszenarien abgeleitet, die eine Beschreibung dieser zulassen. Mit einer Teilauswahl der relevantesten Minimalszenarien wurde eine Verifikationsstudie mit  $N = 6$  Fahrern durchgeführt, in der Sequenzen (Aneinanderreihungen von Minimalszenarien) in unterschiedlichen Dynamikabstufungen<sup>1</sup> untersucht wurden.

Im Rahmen der Verifikationsstudie konnten anhand der unterschiedlichen Minimalszenarien stabile Eigenschaften der Simulatoren beobachtet werden, die sich auf Ebene von Geschwindigkeitseffekten, Stabilitätseffekten und Effekten auf Ebene der Regelung und Beanspruchung beschreiben lassen. Insgesamt zeigten sich Indizien für größere Potenziale des dynamischen Simulators für Fragestellungen, die eine

---

<sup>1</sup> Mit Dynamikabstufungen werden im Folgenden unterschiedliche Zielgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen beschrieben.

Rückmeldung des „Fahrgefühls“ erfordern, wohin eine bessere Eignung des statischen Simulators für Fragestellungen indiziert ist, die ein Beanspruchungsniveau erfordern, wie es in der Realfahrt vorliegt.

In einer anschließenden Probandenstudie mit  $N = 15$  Normalfahrern wurde untersucht, inwiefern die in den Minimalszenarien beobachtbaren Fahreigenschaften der Simulatoren auch in dynamischeren Fahrsituationen auftreten. Zu diesem Zweck wurden die Minimalszenarien zu komplexen Fahraufgaben zusammengeführt. Dabei wurde der sogenannte Rapid Serial Visual Presentation Task (RSVP), ein Ausweich- bzw. Ausweich-Brems-Manöver und eine Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr untersucht. Hierbei konnten die generellen Eigenschaften der zwei Simulatoren bzw. des Messmotorrads aus der Verifikationsstudie repliziert werden.

Mit dem vorliegenden Projekt konnten erste Anwendungserfahrungen für eine neuartige Validierungsmethodik für Fahrsimulatoren gesammelt und dokumentiert werden. Darüber Hinaus wurde auf Basis der gewonnenen Daten eine Entscheidungshilfe entwickelt, die Anwender dabei unterstützt in Abhängigkeit von der vorliegenden Fragestellung die richtige Versuchsumgebung auszuwählen.

## **Possible Applications for Motorcycle Simulators**

Many safety-related research questions in the passenger car sector are already being investigated by using driving simulators. In addition, there are many studies that address the transferability of the results gained in car-simulators to real road traffic. In contrast, the use of motorcycle simulators is in a rather early stage. Nevertheless, large experience in the passenger car domain has shown that driving simulators can make a significant contribution to road safety. This potential has yet to be shown for motorcycle simulators.

Motorcycle simulators for research and development purposes with a complex technical structure are available in very few research institutions. There are hardly any scientific studies on the applicability or transferability of the achieved results. In addition, it has not been clarified which configuration level of motorcycle simulation is necessary to investigate specific research questions. This is a large deficit of motorcycle simulators, especially when today's high counts of heavy and fatal accidents of motorcyclists demand for innovative solutions in accident prevention and severity mitigation. Performing safety-relevant studies on motorcycle simulators could – just like in the car domain – become an important and harm-free tool to efficiently investigate e.g. intervening assistance systems like autonomous emergency braking or evasion systems. Also, rider trainings in a totally risk-free environment might be a welcome usecase to generate a positive effect on the safety of real road riding.

Accordingly, two goals were set for the present project. Firstly, knowledge about the potential applications of motorcycle simulators of different configuration levels has to be gained. This should result in a best practice that helps the simulator users to decide, which investigation allows for the use of motorcycle simulators of certain configurations. Secondly, the project aims at developing a novel method for the validation of motorcycle simulators. This method should allow justified assessments of motorcycle simulator validity, regarding the potential applications mentioned above, with a defined number of investigations.

The main assumption of the method is that complex riding tasks can be divided into smaller units that allow for discrimination of specific rider input characteristics, the so-called minimal-scenarios. These minimal-scenarios are riding tasks such as starting from a standstill, initiating a curve at constant velocity or braking to standstill. Furthermore, it is assumed that minimal-scenarios can be reorganized to complex riding tasks. This is intended to describe the variety of potential applications with a necessary minimum of elementary tasks in order to reduce the validation effort.

For a first assessment regarding the impact of simulators' configuration levels, the investigation was carried out with a Honda NC 700 X (equipped measurement motorcycle), the dynamic "DESMORI" motorcycle simulator and the static motorcycle simulator from WIVW GmbH. To achieve a holistic view, dynamic riding parameters were complemented by objective and subjective parameters regarding riders' behaviour and workload.

Minimal-scenarios were derived based on a large number of potential fields of application in the present project. With a selection of the most relevant minimal-scenarios, a verification study was conducted with  $N = 6$  riders, in which sequences (pragmatic combinations of minimal-scenarios) were examined at different levels of riding dynamics (e.g. different test-speeds, acceleration-/ deceleration-levels).

Concerning the results, the different sequences revealed stable properties of the simulators, which can be described as speed effects, stability effects and effects on the level of operating vehicle controls and workload. Overall, there are indications for a better applicability of the dynamic simulator for questions that require a proper feedback regarding “riding experience”, whereas a better applicability of the static simulator is indicated for research questions that require a level of workload which corresponds to real riding.

In a subsequent study with  $N = 15$  participants, minimal-scenarios were restructured to more complex riding tasks, based on the findings from the verification study. The so-called Rapid Serial Visual Presentation Task (RSVP), an avoidance manoeuvre or combined avoidance-braking manoeuvre and a route on public roads were examined in all three test environments. The general simulators’ characteristics, which already were found in the verification study, were largely replicated.

The present project has generated first experiences for the application of a novel validation method for driving simulators. In addition, a database could be created that serves as a basis for the decision on the selection of a suitable test environment for a specific use case.

## Summary

### Possible Applications for Motorcycle Simulators

#### 1 Introduction and general methodology

Despite the progress made in the past years in the field of road safety, motorcycling is still associated with considerable risks. In contrast to cars and other vehicles, motorcycles offer little protection in the event of an accident, which is associated with a higher vulnerability of the rider and thus often a higher severity of the accident.

Safety-relevant research questions related to road traffic are often investigated with the help of (car) driving simulators. These offer the advantage that a large number of questions can be investigated efficiently and in a protected environment. Thus, the investigation of safety-relevant questions, which in real driving would only be possible with high efforts and a remaining residual risk, becomes feasible. Driving simulators are well established in road safety research. The extent to which findings gained in driving simulators can be transferred to real road traffic has also been investigated. In comparison, the use of motorcycle simulation is at a rather early stage. Scientific studies on the applicability or transferability of the results obtained are almost non-existent. Furthermore, it is not clear which configuration levels of motorcycle simulators are necessary to answer specific research questions.

The aim of the present project is to gain new insights into the possible applications of motorcycle simulators with different configuration levels. Based on this knowledge, a decision support system will be developed, which will give advices for which kind of questions motorcycle simulators (in different configurations) can be used.

Validation studies are necessary to judge possible fields of applications for motorcycle simulators. Validation methods, as they are common in the car simulator domain, are only conditionally applicable. These methods are typically characterized by the procedure that separate validation studies would have to be carried out for each driving simulator, in each driving task and for each possible additional task, which is costly and not very economical. Accordingly, an alternative approach for the validation of motorcycle simulators is to be developed in the present project, in which complex driving tasks are broken down into smaller components - the so-called minimal scenarios. This approach enables a much more economical investigation of the characteristics of a simulator than it has been the case so far. The extent to which the new methodology can be successfully applied will be examined within the framework of the project. In order to answer the question regarding possible fields of application as well as to investigate the newly developed methodology, a total of two studies will be conducted.

#### 2 Verification Study

The aim of the verification study was to investigate a selection of minimal scenarios.  $N = 6$  riders participated, who are experienced with motorcycle simulators and are able to scientifically evaluate the riding dynamic behavior of a real vehicle. Within the scope of the project, a total of 16 minimal scenarios were identified, which, alone or in combination with each other, make it possible to map all riding tasks identified as relevant. A selection of these scenarios was made and investigated in the studies (Figure 2-21). This selection is made to reduce the study efforts to a reasonable amount and is based on the relevance of the minimal scenarios to miming typical riding scenarios. Since the minimal scenarios cannot be driven in an isolated form (e.g., target braking to a standstill is not possible without previous driving), the minimal scenarios were combined into sequences for the test rides.

The sequences were investigated on a real vehicle, the dynamic DESMORI motorcycle simulator and the static motorcycle simulator of WIVW GmbH to compare and rate their (dis-)similarities. The Peripheral Detection Task (PDT) was used as a method to measure rider workload. Here, a visual stimulus is presented in the peripheral field of view of the rider, to which the rider should react by pressing a button. In addition, riders were asked to rate their subjectively experienced workload level after each minimal scenario.

MSC 0	→	Starting from standstill		
MSC 1	→	Constant riding (straight ahead)		Sequence 1
MSC 2	→	Car following		
MSC 3	→	Target acceleration		
MSC 4	→	Target braking to standstill		Sequence 2
MSC 5	→	Adaptive braking (after signal)		
MSC 6	→	Constant cornering		
MSC 7	→	Cornering at constant velocity (initiation)		Sequence 3
MSC 8	→	Cornering at constant velocity (completion)		
MSC 9	→	Braking while cornering (initiation)		Sequence 4
MSC 10	→	Accelerating while cornering (initiation)		
MSC 11	→	Braking while cornering (completion)		
MSC 12	→	Accelerating while cornering (completion)		
MSC 13	→	Braking while constant cornering		
MSC 14	→	Accelerating while constant cornering		

Figure 2-212: Identified minimal scenarios and selections investigated in the studies and sorted into sequences. Cancelled minimal scenarios were identified but not subject to investigation.

### 3 Results - Verification Study

The results are divided into speed effects, stability effects, effects on the level of control behavior and workload, and results of the final inquiry:

#### Speed Effects

In both simulation environments, speed deviations compared to real riding can be observed in longitudinal scenarios. Thus, trips with long speed oscillations (overshooting and undershooting the target speed) occur, which is more pronounced in the static simulation. In both simulation environments, there are large inter-individual differences in terms of the chosen speed while cornering, whereas in real riding, the curves are ridden rather homogeneously. Possible reasons for this behavior can be the velocity feedback of the simulators or the vehicle dynamics model of the respective simulator.

#### Stability effects

In real riding, moderate roll angle oscillations can be observed while riding straight-ahead. These are a consequence of the rider stabilizing the vehicle. On the dynamic simulator, however, larger oscillations occur, which indicates greater instability in the low-speed range of the simulator compared to the real vehicle. With increasing speed, the roll angle oscillations approach the level of real riding. The static simulation shows an extremely low oscillation behavior in straight-ahead riding across all speeds. This results from the underlying simplified single-track vehicle dynamics model. All in all, the static simulator system is too stable for a motorcycle and does not correspond to the physical driving behavior of a single-track vehicle.

During cornering, the roll angle is very homogeneous in real riding. In contrast, the dynamic simulator shows clear oscillations of the roll angle in the same maneuvers, which indicates corrections of the trajectory by the rider. The absolute level of the roll angle is approximately on the level of the real vehicle. Once again, the static simulation shows an almost oscillation-free behavior in curves. In addition, the absolute level of the roll angle is significantly below that of the real vehicle.

#### Effects on control behavior and workload levels

In real riding, only moderate corrective actions on the throttle twist grip and the brakes are apparent for velocity control in constant straight-ahead riding. Both simulation environments show more and larger control interventions in longitudinal control than in real riding, which is more pronounced in the static simulation. In the static simulation, larger steering angles were observed, which were necessary to maneuver the simulated vehicle. This is a consequence of the simplified single-track vehicle dynamics model. The subjectively experienced workload while riding the static simulator matches the workload of real riding very well. This is true across all examined minimal scenarios. The experienced workload in the dynamic simulation is always higher than in the other two test environments. Hence, there is a comparable pattern (Figure 3-31).

The results of the PDT show a better match between static simulation and real riding. In some cases, the level of the static simulation is below the level of real riding, so that an underestimation of the workload is assumed. In the dynamic simulation, the PDT performance seems to tendentially decrease with increasing riding dynamics.

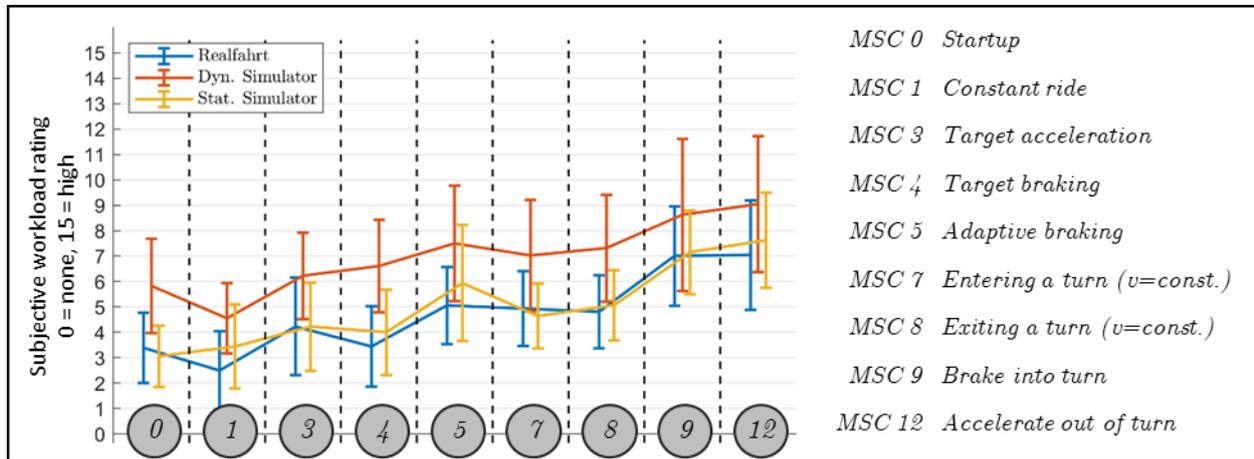


Figure 3-312: Experienced workload levels in the different minimal scenarios as a function of environment.

### Results of the final inquiry

The riders rated the dynamic simulator as more realistic than the static motorcycle simulator in terms of steering and overall impression. The interaction with the dynamic simulator was also rated as more natural. The stabilization of the dynamic simulator approaches the stabilization of the real motorcycle with increasing speed. Hence, the cornering stability is evaluated as too low for the dynamic motorcycle simulator. In the static simulation the stabilization is evaluated as too high. Visual and haptic/proprioceptive feedback of the vehicle dynamics is evaluated as too weak in both simulation environments.

## 4 Participant study

In a participant study with  $N = 15$  subjects, the minimal scenarios were combined into more complex riding maneuvers. This tested the assumption that it is possible to combine the identified minimal scenarios back to more complex riding tasks. A measuring motorcycle of the type KTM 790 Duke, the dynamic motorcycle simulator, and the static motorcycle simulator of the WIVW GmbH were used for the participant study. The study is divided into three sections, which each rider completed in all three test environments.

### Evasion / brake-evasion scenario

The task of the riders was to take evasive action (*Entering and exiting a turn at constant speed*) or an evasive maneuver with braking (*Entering and exiting a turn, target or adaptive braking*). For this purpose, an additional display showed a color indicating the evasive trajectory to the rider. The trajectories were marked by different colored pylon lanes. The differentiation between pure evasion and evasion and braking was indicated to the rider by the word "Stop" in the display. The target speed for the entire riding task was 35 km/h.

### Secondary task performance while riding

Riders engaged in the so-called Rapid Serial Visual Presentation Task (RSVP) while riding on an oval shaped track (*Entering and Exiting a turn, constant ride on a straight line*). The RSVP is a visual-manual secondary task in which the subject's task is to react to previously defined stimuli (numbers) among distractors (letters) by pressing a button. The primary riding task is to ride through the oval-shaped pylon alley at a self-selected speed while completing the RSVP.

### Ride on public roads

The third section for the participants was a trip on public roads. The task of the riders was to complete a predefined route in compliance with the road traffic regulations (*various minimal scenarios*). This should provide an additional impression for the comparability of a natural riding task in all three test environments.

## 5 Results - Participant study

### Evasion / brake-evasion scenario

In accordance with the expectations coming from the verification study, the dynamic simulator is significantly more unstable. The static simulation is significantly more stable while lower roll angles are observed compared to real riding (Fig. 5-51, top line). The riders manage to come to a stop within the predefined range in all three test environments (Fig. 5-51, bottom line). The fulfillment of the riding task is rated lower in the static simulation, while the dynamic simulation and real riding are on a comparable level.

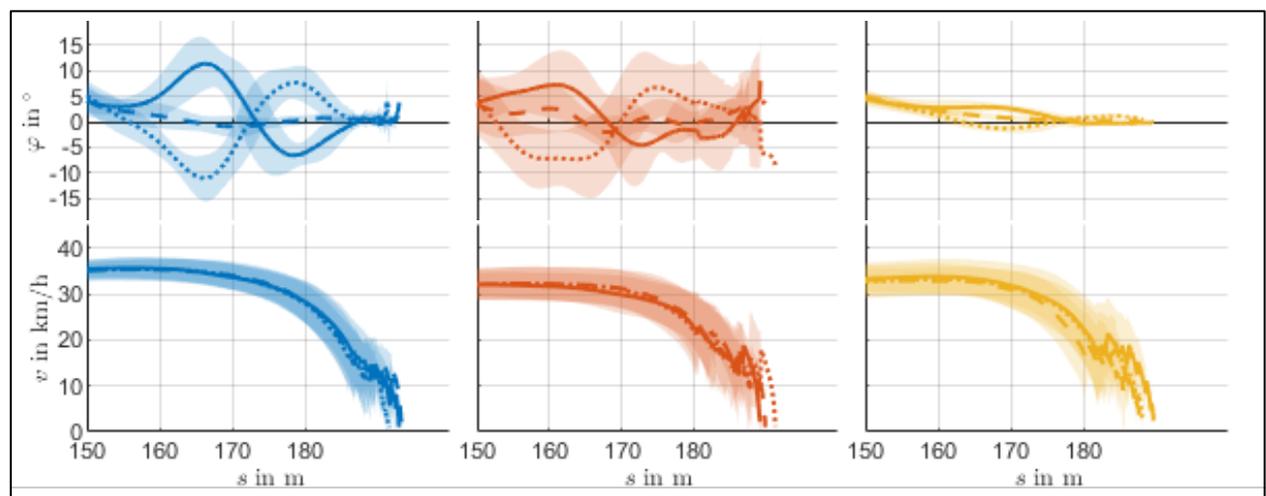


Fig. 5-512: Roll angle and speed during the combined evasion-brake maneuver. Lines show mean values, shaded areas the standard deviation across the participant panel. The different line types indicate the directions of travel: solid = left, dotted = right, dashed = straight ahead.

### Secondary task performance while riding

While performing the riding task, the response times to the RSVP correspond better between real riding and static simulation, compared to the dynamic simulation. The subjectively experienced workload resulting from the RSVP operation shows no effect between the three environments. The direction of travel shows a significant effect, so that travelling clockwise is perceived as more challenging. The fulfillment of the riding task is tententially evaluated better in the static simulation.

### Ride on public roads

While cornering without instructed speed (100 km/h speed limit), the chosen speed in the static simulator matches better with the speed in real riding. The produced roll angles during cornering without speed restriction are in line with the expectations based on speed profiles for real riding and the dynamic simulation. In the static simulation the roll angles are significantly lower as in the previous observations, which is due to the simplified vehicle dynamics model.

## 6 Conclusion

Overall, the results from the verification study and participant study paint a consistent picture, providing first evidence for the suitability of the developed methodology. The minimal scenarios can be combined to more complex scenarios while the typical characteristics of the respective test environment are preserved. In order to finally evaluate and statistically validate the methodology, studies with larger sample sizes are necessary. No global statement can be made regarding the specific fields of application for motorcycle simulators. To systematize the decision for or against a certain test environment, a decision tree is proposed in the following (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**):

In order to assess the suitability of a test environment for a specific research question, it is firstly necessary to assess the risk and the effort required for implementation in real riding. If an investigation in real riding should prove to be too risky or too costly, it must be considered whether a realization in simulation is generally possible, or which form of simulation seems to be suitable. Depending on the problem at hand and the characteristics of the available simulators, a static or dynamic motorcycle simulator can be used.

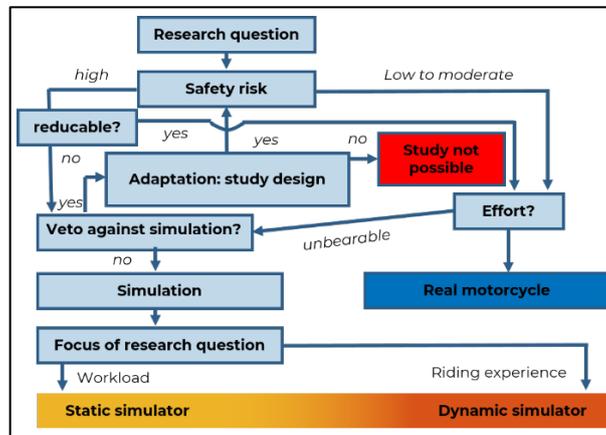


Figure 6-61: Decision tree for selecting the test environment.

The available studies show different strengths and weaknesses of certain configuration levels driving simulators. It becomes clear that motorcycle simulators are highly suitable research tools, depending on the match between configuration level and research question at hand. Since a simulation is, by definition, only a replica of reality, which inevitably shows deviations from it, it is necessary to interpret these deviations outside the areas relevant to the investigation. Thus, deviations in the representation of motion can be tolerated, for example, in HMI questions, but not in studies where the riding experience is of great importance.

On the basis of the present project it can be assumed that static motorcycle simulators, which have a simple vehicle dynamics model, are already suitable at this stage for the investigation of questions dealing with workload and distraction of riders, since, at least in the case of the static simulator investigated here, a good correspondence of the rider's workload to real riding was shown. Dynamic simulators, which have a complex reproduction of the riding behavior of a motorcycle, show potentials for mapping the behavior of a motorcycle. However, further developments are necessary until a widespread use is possible. In the case of the present dynamic motorcycle simulator, for example, a further development is necessary with regard to the vehicle stability (esp. at low speeds), while maintaining agility, in order to enable natural and easy riding. Nevertheless, it can already be stated at this point in time that motorcycle simulators are tools which, if used appropriately, can make an important contribution to research and development in the motorcycle sector. Especially in the case of safety-relevant issues, the technology can be an enriching addition to the research infrastructure.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b> .....	<b>14</b>
2.1	Bedeutung der Fahrsimulation als Untersuchungswerkzeug .....	14
2.2	Validitätskonzepte im Kontext der Fahrsimulation .....	16
2.3	Validierungsmethodik und Erkenntnisse aus der Pkw-Fahrsimulation .....	18
<b>3</b>	<b>Grundlegende Methodik und Vorgehen</b> .....	<b>20</b>
3.1	Annahmen und Vorgehen .....	20
3.2	Definition der Minimalszenarien .....	21
3.3	Validitätsbewertung .....	23
<b>4</b>	<b>Verifikation der Simulatoren anhand der Minimalszenarien</b> .....	<b>24</b>
4.1	Methodik der Verifikationsstudie .....	24
4.1.1	Messaufbau .....	24
4.1.2	Messgrößen .....	27
4.1.3	Auswahl der Minimalszenarien und Sequenzen .....	29
4.1.4	Probanden .....	34
4.1.5	Ablauf .....	34
4.2	Ergebnisse – Verifikationsstudie .....	34
4.2.1	Geschwindigkeitseffekte .....	35
4.2.2	Stabilitätseffekte .....	38
4.2.3	Fahrebene .....	44
4.2.4	Nachbefragung .....	49
4.3	Diskussion der Ergebnisse - Verifikationsstudie .....	56
<b>5</b>	<b>Probandenstudie</b> .....	<b>57</b>
5.1	Methodik der Probandenstudie .....	57
5.1.1	Messaufbau und Messgrößen .....	57
5.1.2	Fahraufgaben .....	59
5.1.3	Probanden .....	62
5.1.4	Ablauf .....	62
5.1.5	Statistische Auswertung .....	63
5.2	Ergebnisse – Probandenstudie .....	64
5.2.1	Ausweichen und Bremsen .....	64
5.2.2	Nebenaufgabe .....	69
5.2.3	Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr .....	73
5.2.4	Nachbefragung - Probandenstudie .....	76
5.3	Diskussion der Ergebnisse – Probandenstudie .....	79
<b>6</b>	<b>Bewertung der Methodik</b> .....	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>Anwendungsfälle von Motorradsimulatoren</b> .....	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>93</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>94</b>
11.1	Nachbefragung .....	94

## 1 Einleitung

Trotz der in den vergangenen Jahren erreichten Fortschritte im Bereich der Straßenverkehrssicherheit ist Motorradfahren weiterhin mit nicht unerheblichen Risiken verbunden. Motorräder bieten im Gegensatz zu Pkw und anderen Fahrzeugen im Falle eines Unfalles kaum Schutz, was mit einer höheren Verletzbarkeit der Fahrer<sup>2</sup> und damit häufig auch einer höheren Unfallschwere einhergeht. So kamen im Jahr 2019 auf 100 000 zugelassene Krafträder zwölf getöte Fahrer, wohingegen sich diese Zahl im Fall von Pkw auf drei beschränkt (DESTATIS, 2020a). Weiterhin sind Unfallereignisse mit dem Motorrad relativ gesehen häufiger als mit dem Pkw. So verunglückten im Jahr 2019 sechs Benutzer bezogen auf 1000 zugelassene Krafträder mit amtlichem Kennzeichen, gegenüber nur fünf Benutzern bei den Pkw (ebd.).

Insbesondere Fahranfänger sind betroffen. So starben in der Gruppe der 15- bis 24-Jährigen dreimal so viele Fahrer, wie in der Gruppe der 25- bis 35-Jährigen. In der Statistik treten etwa ein Drittel der Schäden bei Alleinunfällen auf. Bei den Unfallhergängen mit Unfallgegnern ist dieser in vier von fünf Fällen ein Pkw. Der Pkw ist dabei in zwei von drei Fällen Unfallverursacher, jedoch nur in 7% Unfallopfer.

Entsprechend ist es von hoher Priorität die Sicherheit der Motorradfahrenden weiter zu erhöhen und durch gezielte Maßnahmen (z.B. infrastrukturelle Maßnahmen, Optimierung der Fahrzeugtechnik und Assistenzsysteme, kommunikative Maßnahmen, Fahrtrainings etc.) eine weitere Reduktion der Unfallzahlen sowie der Unfallschwere herbeizuführen. U.a. bei der Entwicklung entsprechender Maßnahmen leistet die Verkehrssicherheitsforschung und die daraus resultierenden Erkenntnisse einen entscheidenden Beitrag.

Sicherheitsrelevante Forschungsfragen mit Bezug zum Straßenverkehr werden oftmals mit Hilfe von (Pkw-) Fahrsimulatoren untersucht. Diese bieten den Vorteil, dass eine Vielzahl von Fragestellungen effizient und in einem geschützten Raum untersucht werden können. So wird auch die Untersuchung sicherheitsrelevanter Fragestellungen, die in der Realfahrt nur mit hohen Aufwänden und einem verbleibenden Restrisiko möglich wäre, umsetzbar. Dieses Restrisiko ist im Motorrad-Sektor weiterhin höher als im Pkw-Sektor. Ebenso ermöglicht das hohe Maß an Standardisierung in Simulatorstudien den direkten Vergleich verschiedener Bedingungen und Maßnahmen. So zum Beispiel die Analyse von Verhaltensunterschieden beim Durchfahren einer Kurve, die einmal mit und einmal ohne flexible Fahrbahnteiler dargestellt wird, während alle anderen Bedingungen identisch bleiben. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von Simulatoren ist, dass dort noch nicht zugelassene Technologien, wie z.B. neuartige Assistenzsysteme, vergleichsweise einfach implementiert und deren Auswirkungen untersucht werden können.

Fahrsimulatoren sind in der Verkehrssicherheitsforschung gut etabliert. Auch inwiefern sich in Fahrsimulatoren gewonnenen Erkenntnisse auf den realen Straßenverkehr übertragen lassen, wurde eingehend untersucht (z.B. BLANA, 1996; UNDERWOOD, CRUNDALL & CHAPMAN, 2011; WYNNE, BEANLAND & SALMON, 2019). Im Vergleich dazu befindet sich der Einsatz der Motorradsimulation in einem sehr frühen Stadium. Dies liegt darin begründet, dass die Simulation von Einspurfahrzeugen aufgrund des typischen Lenkverhaltens, der Instabilität bei Niedriggeschwindigkeit, sowie – sofern relevant – der Bewegungsdarstellung unter Berücksichtigung von Lehnwinkeln, größere Herausforderungen birgt, als es bei der Simulation von Zweispurfahrzeugen der Fall ist. Die langjährigen Erfahrungen im Pkw-Sektor zeigen, dass Fahrsimulatoren einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit leisten können. Dieses Potenzial gilt es für Motorradsimulatoren ebenfalls nachzuweisen.

Motorradfahrsimulatoren – insbesondere mit einem komplexen technischen Aufbau für Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen – wurden bislang nur in sehr wenigen Forschungseinrichtungen aufgebaut (für tabellarische, detaillierte Übersichten vgl. WILL, 2017 und STEDMON, 2017). Die existierenden Motorradfahrsimulatoren unterscheiden sich bisweilen stark hinsichtlich

- der bildlichen Darstellung der virtuellen Umgebung (Monitore vs. Projektionen vs. Headmounted Displays, alle mit verschiedenen Bildauflösungen oder -wiederholungsraten),
- der Bewegungsdarstellung (stillstehendes Fahrzeug „statischer Simulator“ vs. ein- oder mehrachsige Bewegungsplattform „dynamischer Simulator“),

---

<sup>2</sup> Der besseren Lesbarkeit halber werden Personenbezeichnungen in diesem Bericht ausschließlich in der grammatikalisch maskulinen Form verwendet. Sofern nicht anders gekennzeichnet, bezeichnen sie Personen beiderlei Geschlechts.

- der Erfassung von Fahrereingaben (Lenkwinkel vs. Lenkmoment, Schaltung vs. Automatik, Messung der Aufsassenpositur oder Fußrastendruck),
- der genutzten Fahrdynamikmodelle, welche von einfachen, linearen Einspurmodellen bis hin zu komplexen Mehrkörpersimulationsmodellen reichen können,
- der künstlichen Reize, welche zur Imitation realer Reize genutzt werden (bspw. aktive Rahmenlängeneränderung oder Seilzugsystem zur Beschleunigungsabbildung).

Der Aufbau dynamischer Simulatoren mit einer Vielzahl angebotener Reize und hochauflösender Grafik etc. ist offenkundig mit deutlich höherem Invest verbunden, als einfache, statische Aufbauten. Ihr Mehrwert für Forschungs- und Entwicklung ist jedoch bislang unklar. Wissenschaftliche Studien zur Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit der mit Motorradsimulatoren erzielten Ergebnisse liegen – unabhängig von der Art des Simulatorenaufbaus – nahezu nicht vor. Darüber hinaus ist nicht geklärt, welche Ausbaustufen der Motorradsimulation für die Beantwortung spezifischer Fragestellungen hinreichend oder notwendig sind. WILL (2017) zeigt, dass die Nutzung bestimmter Bewegungsreize eine bessere Geschwindigkeitswahrnehmung der Probanden zur Folge hat. Doch inwieweit diese verbesserte Wahrnehmung sich in einer höheren Aussagekraft von Studien über warnende Assistenzsysteme oder einer gestiegenen Wirksamkeit von Fahrtrainings zur Gefahrenwahrnehmung niederschlägt, bleibt unklar.

Dieses Defizit an vorhandenen Kenntnissen über die Einsatzmöglichkeiten von Motorradsimulatoren führt zu einem mangelnden Vertrauen von Forschern und Entwicklern in die Anwendung dieses Werkzeugs in ihren Forschungs- und Entwicklungsprozessen und stellt somit eine Einschränkung in dessen Nutzbarkeit dar. Insbesondere die mangelnde Einschätzbarkeit dessen, wie sich Fahrten in der Simulation mit Fahrten in der Realfahrt vergleichen lassen, erschwert die Interpretation von Studienergebnissen, die in Motorradsimulatorstudien erarbeitet wurden.

Dementsprechend ist eine Durchführung umfassender Validierungsstudien für Motorradsimulatoren notwendig, um diese in möglichst aussagekräftiger Weise für (insbesondere sicherheitsrelevante) Forschungsfragen heranziehen zu können. Herausfordernd stellt sich hierbei die Anwendung von Validierungsmethodiken dar, wie sie im Bereich der Pkw-Simulation üblich sind. Diese haben zu eigen, dass für jeden Fahrsimulator, in jeder Fahraufgabe und für jede möglicherweise hinzukommende Aufgabe separate Validierungsstudien durchgeführt werden müssten, was aufwändig und wenig wirtschaftlich ist und zudem die Einsetzbarkeit zur Beantwortung sicherheitsrelevanter Fragen verzögern würde. Dementsprechend soll im Rahmen des vorliegenden Projekts ein alternativer Ansatz zur Validierung von Motorradsimulatoren entwickelt werden, in dem komplexe Fahraufgaben in kleinere Bestandteile – die sogenannten Minimalszenarien – zerlegt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine deutlich ökonomischere Untersuchung der Eigenschaften eines Simulators als es bisher der Fall war. Inwiefern die neue Methodik erfolgreich angewandt werden kann wird im Rahmen des Projektes überprüft.

Der Ansatz sieht dabei nach der Ableitung der Minimalszenarien eine Untersuchung vor, in der von erfahrenen Motorradfahrern mit fundierten Kenntnissen über die Motorradfahrdynamik Minimalszenarien in unterschiedlichen Dynamikbereichen (unterschiedliche Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen und Kurvenradien) untersucht werden. Mit Hilfe dieses Vorgehens werden die grundlegenden Charakteristika der jeweiligen Motorradsimulatoren in unterschiedlichen Dynamikbereichen untersucht.

Des Weiteren wird im Rahmen der Methode angenommen, dass sich die in den Minimalszenarien beobachteten Eigenschaften der Motorradsimulatoren, z.B. während einer Kurvenfahrt, auch komplexere Fahraufgaben übertragen lassen. Um diese Annahme zu überprüfen und die Datenbasis zu den Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren zu erweitern, wird eine Probandenstudie mit Normalfahrern durchgeführt, in der Minimalszenarien zu komplexeren Fahraufgaben zusammengeführt werden.

Erweist sich das beschriebene Vorgehen als erfolgreich, soll hierdurch die Möglichkeit bestehen, Simulatoren bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten auf effiziente Weise beurteilen zu können, eine adäquate Versuchsumgebung für eine zu untersuchende Fragestellung auszuwählen und die gewonnenen Erkenntnisse im Entstehungsprozess neuer Simulatoren einfließen zu lassen.

Im Falle der Eignung der Methode besteht somit für den Anwender der Vorteil, dass auch bei neuentwickelten Simulatoren (auch anderer Fahrzeuge) auf vergleichsweise schnelle Weise Einschätzungen über deren Anwendungsmöglichkeiten getroffen werden können, wodurch Studien, die die Verkehrssicherheit nachhaltig beeinflussen können, einfacher zugänglich werden.

Im vorliegenden Bericht wird hierfür zunächst auf den Begriff der Validität und der Validierung von Fahrsimulatoren eingegangen. Daraus wird die Methodik, die im vorliegenden Projekt entwickelt wurde, abgeleitet. Es folgt die Darstellung der beiden Studien. Hierbei wird aufgezeigt, wie sich die untersuchten Simulatoren hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für unterschiedliche Anwendungsfälle unterscheiden. Abschließend findet eine Evaluierung der Methodik und eine Zusammenfassung der Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren statt.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Kapitel findet eine theoretische Einführung in das Themengebiet Validität und Validierung statt. Hierbei wird insbesondere auf jene Validitätsbegriffe eingegangen, die von Relevanz für die Betrachtung von Fahrsimulatoren sind. Validitätskriterien, wie sie im Kontext der Bewertung psychometrischer Testverfahren zur Evaluation verwendet werden und davon ausgehen, dass ein nicht direkt messbares Konstrukt (z.B. die Intelligenz einer Person) indirekt durch einen Test bestimmt werden kann, finden an dieser Stelle keinen Einzug. Da es sich bei Fahrsimulationen um komplexe Mensch-Maschine-Systeme handelt, die sich durch permanente Rückkopplung auszeichnen, besteht eine andere Ausgangsbasis als bei einem psychometrischen Testverfahren, weswegen andere Validitätsmaßstäbe angelegt werden müssen. Entsprechend untergliedert sich das folgende Kapitel in die Themenebereiche 'Bedeutung der Fahrsimulation als Untersuchungswerkzeug', 'Validitätskonzepte im Kontext der Fahrsimulation', 'Validierungsmethodik' und 'Erkenntnisse aus der Pkw-Fahrsimulation' sowie ein Resümee der Implikationen für das vorliegende Projekt.

### 2.1 Bedeutung der Fahrsimulation als Untersuchungswerkzeug

Für die Untersuchung von Fragestellungen zum Thema Motorradfahren bieten sich grundsätzlich mehrere Versuchsumgebungen an. Um die Anwendungsfelder von Motorradsimulatoren zu bestimmen, werden daher zunächst die verschiedenen potentiellen Versuchsumgebungen hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile analysiert. Hierbei sind Beobachtungsstudien im Realverkehr, Quasiexperimente im Realverkehr, Teststreckenuntersuchungen, Vehicle in the Loop<sup>3</sup>-Aufbauten und die Fahrsimulation als Möglichkeiten zu nennen (vgl. PURUCKER ET AL., 2018). Während Untersuchungen im Realverkehr das natürliche Fahrverhalten ohne kontrollierte Beeinflussung betrachten, wird in einer quasiexperimentellen Untersuchung im Realverkehr bereits eine teilweise kontrollierte Manipulation des Verhaltens (z.B. durch Fahrt mit zwei unterschiedlichen Navigationssystemen als experimentell manipulierte Komponente im öffentlichen Straßenverkehr) vorgenommen, worunter die Übertragbarkeit auf das natürliche Fahrverhalten leidet. Dieser Trade-off verstärkt sich über die Betrachtung von Beobachtungsstudien im Realverkehr hin zur Fahrsimulation. Je größer die experimentelle Kontrolle in einem Versuchsaufbau ist, desto eher können kausale Schlüsse aufgrund der Manipulation gezogen werden. Jedoch steigt mit zunehmender Kontrolle auch die Künstlichkeit der Untersuchung, wodurch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse potenziell eingeschränkt wird. Umgekehrt lassen sich in unkontrollierten und dafür natürlichen Versuchsumgebungen kaum kausale Schlüsse ziehen.

Folglich stellt die Wahl einer Versuchsumgebung immer einen Kompromiss zwischen experimenteller Standardisierung und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität dar. Bild 2-1 stellt diesen Kompromiss nach Versuchsumgebungen gegliedert dar (PURUCKER ET AL., 2018). Eine Auswahl der Versuchsumgebung muss daher immer differenziert für die spezifischen Fragestellungen getroffen werden, da sich die Anforderungen hierbei stark unterscheiden können.

Soll beispielsweise in einer Untersuchung der kausale Effekt unterschiedlicher Warnungen interpretiert werden, ist ein experimenteller Ansatz in einer kontrollierten Versuchsumgebung notwendig. Sollen im Gegensatz dazu Effekte der Langzeitnutzung eines warnenden Assistenzsystems betrachtet werden, könnte

---

<sup>3</sup> Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus Simulation und Realfahrzeug, bei der über Einsatz einer Virtual/Augmented – Reality-Brille Informationen ergänzt werden. Der Einsatz am Motorrad ist bislang nicht bekannt.

ein beobachtender, nicht-invasiver Ansatz zielführendere Informationen liefern. Neben den jeweiligen Anforderungen des Untersuchungsgegenstands an experimentelle Kontrolle und Übertragbarkeit der Ergebnisse muss das Sicherheitsrisiko, die Machbarkeit, die Komplexität des Szenarios und der technische und finanzielle Aufwand in Erwägung gezogen werden, um nur einige weitere Kriterien zu benennen.



Bild 2-1: Darstellung des Zusammenhangs experimenteller Standardisierung und ökologischer Validität bezüglich der verwendeten Versuchsumgebung (aus dem Englischen nach PURUCKER ET AL., 2018: 432).

Die Fahrsimulation bietet hierbei für eine große Bandbreite wissenschaftlicher Fragestellungen Vorteile. Diese liegen, wie bereits beschrieben, in der hohen Kontrollierbarkeit von Umgebungsbedingungen, der Reproduzierbarkeit von Untersuchungsszenarien und der gefahrlosen Darstellung kritischer Situationen, die in einer Realfahrstudie aus ethischer Sicht nicht vertretbar wären (z.B. bei Fragestellungen zur Sicherheit, Risiko und Gefahrenwahrnehmung, Ablenkung, etc., vgl. auch STEDMON ET AL., 2009, BLANA, 1996, BREUER, 2009, CAIRD & HORREY, 2011). Dennoch stellt sich bei allen Untersuchungen, die mit Hilfe von Fahrsimulatoren die Frage, ob die Ergebnisse, die erarbeitet werden, valide sind, ob also auch das gemessen wird, was gemessen werden soll. Anders ausgedrückt stellt sich also die Frage, ob der Fahrsimulator das Realfahrzeug in einer Weise abbilden kann, die den Anforderungen der jeweiligen Studie genügen. Einschränkungen hierfür finden sich an unterschiedlichen Stellen. So liegen auch bei modernen Fahrsimulatoren grundsätzlich Einschränkungen bei der Darstellbarkeit sensorischer Reize vor, die sich auch mit äußerst großem Aufwand im besten Falle minimieren, aber nicht vollständig eliminieren lassen. PURUCKER ET AL. (2018) fassen diese für Pkw-Simulatoren wie folgt zusammen (ergänzt um zusätzliche Anmerkungen):

- Visuelle Details können nur in reduzierter Form dargestellt werden und sind durch die verfügbare Rechenleistung stark begrenzt. Hierdurch kann eine exakte Nachbildung eines realen Fahrszenarios auch in weit entwickelten Fahrsimulatoren nur angenähert werden. Jedoch könnten derartige Einschränkungen aufgrund der Entwicklungen in der Display- und Projektionstechnik in der Zukunft weiter reduziert werden.
- Limitierungen in der Darstellbarkeit von Helligkeits- und Farbkontrasten sowie das Auftreten optischer Verzerrungen können sich negativ auf die Validität für Fragestellungen auswirken, die die Sichtbarkeit von Objekten als Kernelement beinhalten (ESPIÉ ET AL., 2005).
- Gegenwärtige Leinwand-, Bildschirm- und VR-Brillen-Technologien ermöglichen keine oder nur eingeschränkte dreidimensionale Darstellungen<sup>4</sup>.
- Akustische Hinweisreize können nur in eingeschränkter Form wiedergegeben werden.
- Auch bei äußerst aufwendigen Aufbauten ist eine akkurate Darstellbarkeit fahrdynamischer Größen nicht gegeben. Hierbei kann abermals auf die Arbeit von ESPIÉ ET AL. (2005) verwiesen werden, in der die Diskrepanz zwischen benötigten und realisierbaren Beschleunigungen in Pkw-Simulatoren dargestellt werden.

<sup>4</sup> Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von hochauflösenden Displays, 3D-Displays und Projektoren können Defizite in der Darstellbarkeit von räumlicher Tiefe verringert werden. Auch die Weiterentwicklung von VR-Brillen liefert hierfür wichtige Potenziale.

Es ist davon auszugehen, dass die genannten Einschränkungen nicht ausschließlich für die Pkw-Fahrsimulation, sondern auch für die Motorradsimulation Gültigkeit besitzen. Hinzu kommen spezifische Anforderungen der Abbildung des Motorradfahrens, wie beispielsweise die Darstellung von Rollwinkeln und der auftretenden Windlast.

Alle genannten Vorteile und Einschränkungen der Fahrsimulation müssen, wie bereits zuvor erwähnt, in Erwägung gezogen werden, um für den zu untersuchenden Anwendungsfall festzustellen, ob eine Eignung eines spezifischen Fahrsimulators für eine konkrete Fragestellung gegeben ist.

Jedoch muss auch bei gegebener Indikation der Fahrsimulation oder der Motorradsimulation im Speziellen die Frage nach der Güte der Messung gestellt werden. Folgendes Zitat beschreibt die zu behandelnde Thematik: *„Die wahrscheinlich am häufigsten wiederholte, jedoch auch schwierigste Frage bezüglich der Fahrsimulation ist, ob erfasste Maße das Gleiche abbilden wie Maße aus der realen Welt. Diese multidimensionalen Zusammenhänge wurden in der Regel Simulatorvalidierung genannt. Die Simulatorvalidierung wurde als Replikation von Simulations- und Realfahrttests definiert, um festzustellen, in welchem Maß die Messungen zwischen den Umgebungen übereinstimmen.“* (aus dem Englischen nach CAIRD & HORREY, 2011: 5-9).

## 2.2 Validitätskonzepte im Kontext der Fahrsimulation

Seit den 1970er Jahren wurden diverse Validitätskonzepte entwickelt, welche die zuvor genannten Anforderungen der Fahrsimulation hinreichend beschreiben sollen (BLANA, 1996). Allen gemein ist eine Unterscheidung zwischen einer physikalischen Validität, die sich auf die Umsetzung des Fahrzeugverhaltens seitens des Simulators (z.B. ob bei gleicher Ausgangsgeschwindigkeit und gleich starkem Bremsengriff der gleiche Bremsweg resultiert) sowie das Vorhandensein der Bedienelemente aus der realen Fahrumgebung bezieht und einer Verhaltensvalidität, die im Gegensatz dazu auf das vom Fahrer gezeigte Verhalten Bezug nimmt (ALLEN & O'HANLON, 1979, BLAAUW, 1982, BLANA, 1996). Zusätzlich lässt sich die Frage nach dem geforderten Maß der Validität im Sinne der Anforderungen an die Übereinstimmung zwischen Realfahrzeug und simuliertem Fahrzeug stellen. Hierbei wird in der Literatur zwischen absoluter und relativer Validität unterschieden. Während unter absoluter Validität eine exakte Übereinstimmung zwischen Realfahrzeug und Simulation verstanden wird, steckt die relative Validität kulantere Grenzen ab. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen den beiden ermittelten Messgrößen erwartet, der zuverlässig die Richtung eines Effekts abbildet (z.B. relative Validität: sowohl in der Realfahrt als auch in der Simulation wird als Reaktion auf eine Warnung gebremst, dabei erfolgt der Bremsengriff in der Simulation jedoch immer stärker als in der Realfahrt; absolute Validität: in der gegebenen Situation erfolgt der Bremsengriff auf exakt gleiche Weise in der Simulation wie in der Realfahrt). Besteht kein Zusammenhang zwischen den ermittelten Messgrößen, kann keine Form der Validität angenommen werden (GODLEY ET AL., 2002, BLAAUW, 1982). In Bild 2-2 sollen diese Zusammenhänge der Messgrößen aus der Realfahrt und der Fahrsimulation schematisch dargestellt werden (in Anlehnung an CAIRD & HORREY, 2011). Während die absolute Validität einer perfekten Korrelation zwischen den beiden Versuchsumgebungen entspricht, werden relative Validitäten als lineare Verschiebung dargestellt. Diese kann auch dann angenommen werden, wenn ein positiver Zusammenhang vorliegt, der keine Verschiebung einer perfekten Korrelation in y-Richtung aufweist, sondern überdies in der Steigung variiert. Keine Validität wird dann angenommen, wenn keine positive Korrelation zwischen den beiden Versuchsumgebungen auftritt.

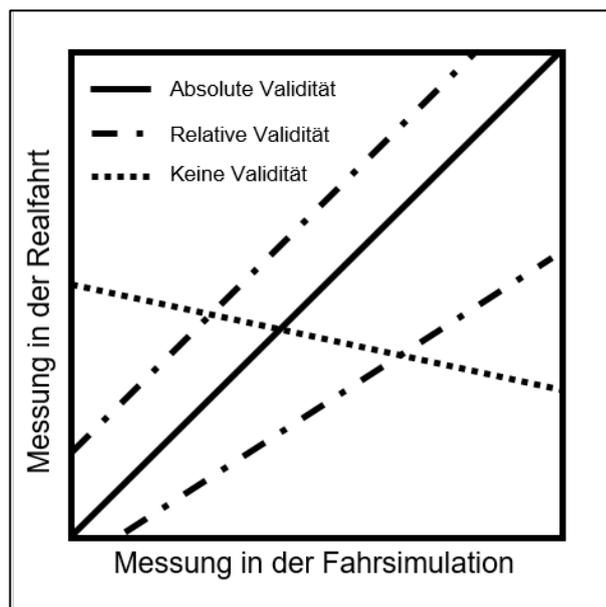


Bild 2-2: Schematische Darstellung des Übereinstimmungsgrads zwischen Realfahrt und Fahrsimulation (in Anlehnung an CAIRD & HORREY, 2011: 5-10, die Darstellung wurde hinsichtlich der relativen Validität und dem Vorliegen keiner Validität geändert).

Auch weitere Begrifflichkeiten werden im Kontext der Fahrsimulatorvalidität gegeben. Eine Einordnung der Begrifflichkeiten findet sich in ZÖLLER (2015). Hierbei werden neben den von BLANA (1996) extrahierten Begrifflichkeiten der physikalischen und Verhaltensvalidität die Termini Augenscheinvalidität als möglichst detaillierter Nachbau eines realen Fahrzeugs und Wiedergabetreue als möglichst realitätsnahe Darstellung der Umwelt genannt. Beide Konstrukte stellen demnach Eigenschaften des Simulators dar. Des Weiteren wird in der Arbeit von Zöller das Konzept der Präsenz erläutert. Es wurde erstmals Mitte des vergangenen Jahrhunderts beschrieben, um das Gefühl des „sich an einem räumlich entfernten Ort zu befinden“ auszudrücken (SUTHERLAND, 1968), welches durch Verwendung von Fernbedienungen induziert wurde. Im Zuge der Digitalisierung wurde das Konstrukt Präsenz auf virtuelle Welten übertragen, um das Ausmaß zu beschreiben, in dem sich eine Person als Teil der virtuellen im Gegensatz zur realen Welt fühlt (SHERIDAN, 1992, STEUER, 1992, WITMER & SINGER, 1994). Der entscheidende Unterschied zu den oben genannten Konzepten liegt in der Definition der Zielkriterien. Zur Erreichung hoher Präsenz gilt es ein virtuelles Umfeld darzubieten, welches den Erwartungen der Personen respektive Fahrer entspricht bzw. ein erfolgreiches Handeln ermöglicht. Dies bezieht sich auf die subjektive Wahrnehmung der Nachbildung der physikalischen Validität, muss aber nicht zwingend mit dieser übereinstimmen (SLATER & WILBUR, 1997). Im Sinne der sog. technologischen Konzepte der Präsenz kann dies durch das akkurate und konsistente Ansprechen möglichst vieler Sinnesreize erzielt werden (ZELTZER, 1992, WITMER & SINGER, 1994). Psychologische Konstrukttheorien beschreiben Präsenz nicht als eigenständiges Phänomen virtueller Welten, sondern über bestehende psychologische Konstrukte, wie Situation Awareness oder Flow-Erleben (WICKENS, 1980, CSIKSZENTMIHALYI, 2000). Eine hohe Präsenz und damit Validität kann durch die gezielte Aufmerksamkeitslenkung auf Reize der virtuellen gegenüber der realen Welt erreicht werden.

Hervorzuheben ist hierbei, dass die genannten Validitätskonzepte nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können (Bild 2-3). So lässt sich beispielsweise der technische Aufbau eines Simulators der physikalischen Validität zuordnen, die aber ggf. wiederum einen Einfluss auf die Wiedergabetreue und die Augenscheinvalidität des Simulators hat. Sowohl die Wiedergabetreue als auch die Augenscheinvalidität wirken sich auf das Präsenzerleben des Fahrers aus, was eine Schnittmenge zwischen technischem Aufbau und menschlichem Verhalten darstellt. Das Verhalten wird durch die physikalische Validität beeinflusst, da es sich aus durch den Fahrer wahrgenommene sensorische Eingangsgrößen ableitet. Die Verhaltensvalidität lässt sich in Fahrverhaltensvalidität und psychologische Aspekte der Validität (wie bspw. Belastung / Beanspruchung) unterteilen.

Durch die beschriebenen Zusammenhänge ist davon auszugehen, dass eine klare Trennung zwischen physikalischer Validität und Verhaltensvalidität nicht möglich ist.

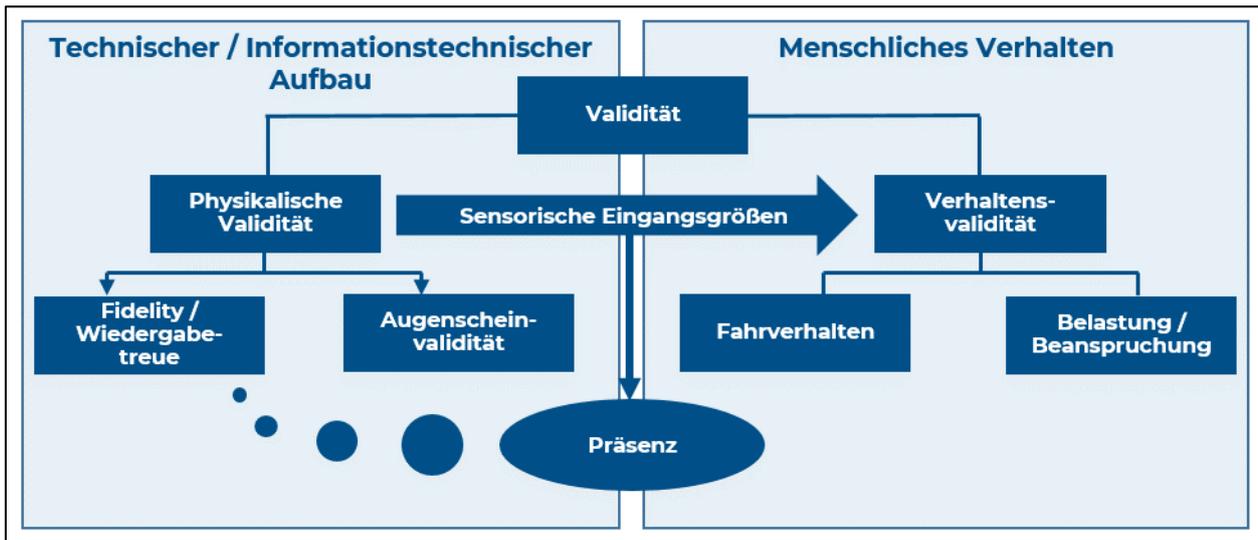


Bild 2-3: Darstellung der Interaktion von technischem Aufbau des Simulators und des menschlichen Verhaltens.

## 2.3 Validierungsmethodik und Erkenntnisse aus der Pkw-Fahrsimulation

Um verwertbare Studienergebnisse zu generieren, also im Sinne der Validität das zu messen, was gemessen werden soll, sind Validierungsstudien vor dem Einsatz eines neuentwickelten Simulators als Forschungsinstrument ein entscheidender Arbeitsschritt. Aus diesem Grund wurden bereits in den 1970er und 1980er Jahren grundlegende Methoden für die Validierung von Fahrsimulatoren vorgestellt. BLAAUW (1982) stellt zur Untersuchung der Fahrverhaltensvalidität unterschiedliche basale Ansätze vor:

- Vergleich von Simulation und Realfahrzeug bei gleichen Bedingungen und unter experimenteller Variation der Bedingungen
- Abschätzung physikalischer und/oder mentaler Beanspruchung über die Messung physiologischer Variablen
- Subjektive Einschätzung durch Fahrer oder beobachtende Experten
- Messung von Transferleistungen auf Basis von Trainings, die in der Simulation durchgeführt werden

Die dargestellte Methodik stellt einen integrativen Ansatz dar, da neben der Erfassung der Fahrverhaltensvalidität durch den Vergleich von Realfahrt und Simulation weitere psychologisch relevante Konzepte des Fahrens erhoben und verglichen werden. Insbesondere die Berücksichtigung der Beanspruchung und des subjektiven Erlebens scheint hierbei von großer Bedeutung, da sonst Diskrepanzen in der Wahrnehmung des Fahrers bei konstantem Fahrverhalten unentdeckt bleiben können.

Da sich Studien zur Validität eines Fahrsimulators meist nur mit einzelnen Parametern beschäftigen (wie beispielsweise der Geschwindigkeitsregelung des Fahrers oder der Fahrstreifenhaltegüte), kann nie von der vollständigen Validität eines Fahrsimulators ausgegangen werden. Eine Simulatorvalidierung kann folglich immer nur für spezifische Anwendungsfälle durchgeführt werden. Zwar können unterschiedliche Systemausbaustufen Einflüsse auf verschiedene Fragestellungen haben (bspw. Auflösung und Größe des Sichtsystems, Freiheitsgrade des Bewegungssystems etc.), jedoch nicht als isolierte Komponenten auf unterschiedliche Simulatoren übertragen werden. Daher lässt sich die Frage der Validität eines Fahrsimu-

lators nicht an den verwendeten Komponenten festmachen. Vielmehr stellt sich die Frage, welche Komponenten<sup>5</sup> für die jeweiligen Fragestellungen bzw. erforderlichen Fahraufgaben im spezifischen Anwendungsfall von Bedeutung sind (CAIRD & HORREY, 2011). Folglich kann das Ansprechen spezifischer Sinnesreize für unterschiedliche Fragestellungen ein notwendiges, jedoch nicht zwangsläufig hinreichendes Kriterium für die Validität des Simulators sein. Die absolute Validität eines Fahrsimulators kann daher praktisch nicht erreicht werden. Für eine Großzahl an denkbaren Anwendungsfällen soll eine Änderung des Verhaltens in eine bestimmte Richtung untersucht werden. Beispiele wären hierfür eine reduzierte Anzahl von Kollisionen durch warnende oder eingreifende Assistenzsysteme oder kürzere Blickabwendungszeiten durch eine alternative HMI-Darstellung. Für Aussagen dieser Art ist die relative Validität eines Simulators für den jeweiligen Anwendungsfall hinreichend.

Dennoch verbleibt die Frage der benötigten Wiedergabetreue eines Simulators für die Erzielung einer zumindest relativen Verhaltensvalidität offen. Nach BLAAUW (1982) muss hierbei nicht zwingenderweise ein Zusammenhang zwischen physikalischer Validität und Verhaltensvalidität bestehen. Zwar kann eine Steigerung der Augenscheinvalidität einen Einfluss auf die Akzeptanz gegenüber einem Fahrsimulator haben, muss jedoch nicht eine Steigerung der objektiv messbaren Validität nach sich ziehen (BLANA, 1996, STEDMON ET AL., 2009). Im Gegensatz dazu wird von anderen Autoren eine gute Wiedergabetreue bezüglich der relevanten Messgegenstände als entscheidendes Kriterium für eine erfolgreiche Validierungsstudie angenommen (z.B. LEONARD JR & WIERWILLE, 1975 nach ZÖLLER, 2015).

Auch die Auswahl der untersuchten Parameter spielt eine entscheidende Rolle bei der Interpretation der Validität. Neben der eingeschränkten Generalisierbarkeit durch das gewählte Prüfzenario stellt sich bezüglich der Fahrerhaltensvalidität die Frage, welche Parameter essenzieller Teil einer Untersuchung sind, bzw. welche Dimensionen des Fahrerhaltens für den jeweiligen Anwendungsfall von Bedeutung sind (BLAAUW, 1982, ESPIÉ ET AL., 2005, ZÖLLER, 2015). Typische Ansätze liegen dabei in der Betrachtung grundlegender Fahrparameter, die vom Fahrer mehr oder weniger aktiv hergestellt werden. Zu nennen wären hierfür beispielsweise die Geschwindigkeit, die Position in einem Fahrstreifen, die Güte der Spurlhaltung, der Abstand zu einem Vorderfahrzeug etc.

Kritisch äußern sich dazu bspw. ESPIÉ ET AL. (2005). Demnach sei bei Einsatz der Fahrsimulation für Human-Factors-Fragestellungen zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Fahraufgaben und die Belastung / Beanspruchung so nah wie möglich an der Realität orientiert sein müssen, um elementare Bestandteile des Fahrens zu erfassen. Durch ein abweichendes Beanspruchungsniveau könne die Reaktion des Fahrers auf einen Eingriff (bspw. ein warnendes Assistenzsystem) zu Reaktionen führen, die wesentlich von der Reaktion auf einen vergleichbaren Eingriff in der Realfahrt abweichen.

Bei der Durchführung von Validierungsstudien spielt des Weiteren die Auswahl des Probandenpanels eine entscheidende Rolle. Eine Erörterung hierzu findet sich in ESPIÉ ET AL. (2005). Hierbei wird nahegelegt, dass sich professionelle Fahrer und professionelle Nutzer eines Fahrsimulators von Normalfahrern unterscheiden. Seitens der professionellen Nutzer ist eine größere Homogenität der Stichprobe im Vergleich zu Normalfahrern anzunehmen. Insbesondere bei der Gruppe professioneller Nutzer der Simulation ist von einer langen Trainingserfahrung am jeweiligen Simulator auszugehen, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Fahrverhalten am Simulator auswirkt. Dies kann als Kompensation der spezifischen Eigenschaften eines Simulators betrachtet werden, die durch die nicht vollständige Abbildbarkeit der Realität zustande kommen.

Soll die Fahrsimulation als Werkzeug für Fragestellungen des Fahrverhaltens angewandt werden, ist es bei der Durchführung von Validierungsstudien entscheidend, auf ein möglichst heterogenes Panel an Normalfahrern zurückzugreifen. Des Weiteren wird im Zusammenhang mit dem gewählten Probandenkollektiv die Verwendung unabhängiger Stichproben in Kombination mit zu kleinen Stichprobengrößen als kritisch betrachtet, wodurch Einflüsse der Person nicht ausgeschlossen werden können (ZÖLLER, 2015).

---

<sup>5</sup> Hierbei sind Komponenten nicht nur im Sinne von Hardwarebauteilen zu verstehen. Vielmehr ist von einer komplexen Interaktion von Hardwarekomponenten (Mockup, Bewegungssystem, Soundsystem, Sichtsystem und möglicher Zusatzreize), deren Ansteuerung über Motion-Cueing-Algorithmen und der Integration in die Gesamtsimulationssoftware auszugehen.

### 3 Grundlegende Methodik und Vorgehen

Im folgenden Kapitel werden das methodische Vorgehen und die dafür notwendigen Annahmen vorgestellt.

#### 3.1 Annahmen und Vorgehen

Im vorangegangenen Kapitel wurden Grundlagen der Validierung von Fahrsimulatoren im Allgemeinen erläutert. Auf dieser Basis werden Anforderungen definiert, die durch eine Validierungsmethodik erfüllt werden müssen. Wie bereits zuvor erläutert, entstehen durch die konsequente Untersuchung aller relevanten Fahraufgaben immense Aufwände bei der Validierung, die mit der im Folgenden beschriebenen Methode reduziert werden sollen. Entsprechend werden zwei Kernannahmen im Rahmen des Projektes eingeführt, die ein alternatives Vorgehen ermöglichen sollen. Hierbei ist anzumerken, dass die beiden Annahmen hypothetischer Natur sind und ein exploratives Vorgehen angewendet wird. Die Gültigkeit dieser Annahmen sowie die Anwendbarkeit des darauf basierenden Vorgehens werden im Rahmen des Projektes überprüft.

##### **Annahme 1: Zerlegbarkeit von Fahraufgaben**

Die zu untersuchenden Fahraufgaben sind in eine begrenzte Anzahl sogenannter Minimalszenarien zerlegbar. Ein Minimalszenario stellt dabei die kleinste handlungsunterscheidende Einheit dar (z.B. das konstante Geradeausfahren oder das Einleiten einer Kurve bei gleichzeitiger Verzögerung). Dadurch soll erreicht werden, dass aus (validierten) Minimalszenarien valide Manöver zusammengesetzt werden können, ohne jedes Manöver einzeln validieren zu müssen und damit der Generalisierbarkeit von Validitätsaussagen ein Stück näher zu kommen.

##### **Annahme 2: Additivität von Minimalszenarien**

In ihrer Konzeption werden Minimalszenarien so definiert, dass nur eine serielle Durchführung möglich ist. Es kann also stets nur ein Minimalszenario zu einem Zeitpunkt stattfinden. Aufgrund dieser Eigenschaft werden Interaktionseffekte zwischen den Minimalszenarien vermieden (z.B. ist es nicht möglich, gleichzeitig mit konstanter Geschwindigkeit geradeauszufahren und eine Kurve mit Verzögerung einzuleiten). Zusätzlich wird angenommen, dass valide abgebildete Minimalszenarien zu ebenfalls validen komplexeren Sequenzen zusammengefügt werden können. Es wird also angenommen, dass die Eigenschaften, die ein Simulator für ein Minimalszenario aufweist, stabil sind, also auch dann erhalten bleiben, wenn das Minimalszenario mit anderen Minimalszenarien kombiniert wird.

Die beiden Annahmen ermöglichen, sofern Indizien für deren Gültigkeit vorliegen, einen deutlich effizienteren Ablauf von Validierungsstudien.

Entsprechend der getroffenen Annahmen, lässt sich das Vorgehen des vorliegenden Projekts wie folgt beschreiben. Auf Basis der zusammengefassten Literaturrecherche im vorangegangenen Kapitel, wird eine neue Validierungsmethodik für Fahrsimulatoren entwickelt, die das Ziel hat, auf effiziente Weise die Simulatorvalidität bewerten zu können. Im Wesentlichen basiert die Methode auf der Annahme, dass Fahraufgaben in kleinere Bestandteile zerlegt werden können (Annahme 1), die sich wiederum zu anderen Fahraufgaben kombinieren lassen (Annahme 2). Als Basis für die Ableitung der Minimalszenarien dient der in Deutschland verwendete Unfallursachenkatalog (z.B. in DESTATIS, 2020b), der bei der polizeilichen Erfassung von Verkehrsunfällen herangezogen wird. Da es im Rahmen des vorliegenden Projekts insbesondere um Anwendungsfälle von Motorradsimulatoren mit Bezug auf die Verkehrssicherheit handelt, werden die Unfallursachen als Ausgangspunkt gewählt. Ziel ist es, Unfallszenarien und Maßnahmen zu deren Vermeidung anhand der Minimalszenarien darstellen zu können um so die bestmögliche Abbildung von im Verkehrssicherheitskontext relevanten Fragestellungen zu ermöglichen. Je nach Untersuchungsschwerpunkt sind andere Ausgangspunkte zur Ableitung der Minimalszenarien denkbar, die sich bspw. auf die Unterscheidung von Längs-, Quer- und Vertikaldynamik in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen begründen. Aufgrund dieser breiten Ausgangsbasis, ist davon auszugehen, dass eine große Zahl relevanter Minimalszenarien identifiziert wird. Die Unfallursachen werden einzeln herangezogen und hinsichtlich der Fahrhandlungen untersucht, die zur Vermeidung notwendig sind.

Das folgende Beispiel soll das prinzipielle Vorgehen verdeutlichen:

- Unfallursache: Nichtbeachten der Regel „rechts vor links“
- Aufgabe des Fahrers: überprüfen, ob sich ein Fahrzeug von rechts nähert.
- Mögliche Fahrhandlungen zur Vermeidung eines Unfalls:
  - Anpassung der Geschwindigkeit,
  - Bremsung in den Stillstand,
  - Einleiten einer Kurve bei gleichzeitiger Bremsung (Ausweichen und Bremsen),
  - Einleiten einer Kurve bei konstanter Geschwindigkeit (Ausweichen).

Entsprechend Annahme 1 werden die Minimalszenarien dabei jeweils so feingliedrig definiert, dass ein simultanes Auftreten zweier Minimalszenarien nicht mehr möglich ist. Bei der Fortsetzung des Vorgehens über weitere Unfallursachen stellt sich innerhalb kurzer Zeit ein Sättigungseffekt ein, sodass keine neuen Minimalszenarien hinzukommen, die benötigt werden, um alle in dieser Situation potentiell auftretenden Handlungsmöglichkeiten des Fahrers zu beschreiben.

Um die Gültigkeit der beiden getroffenen Annahmen zu überprüfen, werden im vorliegenden Projekt zwei Studien durchgeführt: eine Verifikation der Minimalszenarien (Annahme 1), in der diese mit unterschiedlichen Dynamikabstufungen untersucht werden (z.B. unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche, unterschiedlich starke Beschleunigungen oder Verzögerungen etc.) und eine Probandenstudie, in der die Minimalszenarien zu komplexeren Fahraufgaben restrukturiert werden (Annahme 2). Auf Basis der beiden Studien kann abgeschätzt werden, inwiefern sich die Methodik zur Beurteilung der Simulatorvalidität eignet. Ferner können erste Validitätseinschätzungen hinsichtlich der beiden untersuchten Motorradsimulatoren getroffen werden. Auf Grund der Betrachtung der fahrdynamischen Umsetzung, des Fahrerhaltens und der Fahrerbeanspruchung können darüber hinaus Rückschlüsse hinsichtlich der untersuchbaren Anwendungsfelder für den jeweiligen Simulator getroffen werden.

Wie zuvor ausgeführt, werden die identifizierten Minimalszenarien in einer Verifikationsstudie untersucht. Für diese eher technische Verifikation werden Untersuchungsteilnehmer mit einem hinreichenden Hintergrundwissen und ausgeprägter Erfahrung benötigt, um eine adäquate Rückmeldung zur fahrdynamischen Umsetzung der Simulatoren zu geben. Dabei werden alle ausgewählten Minimalszenarien auf einem Realfahrzeug, dem dynamischen sowie dem statischen Motorradsimulator der WIVW GmbH geprüft. Hierdurch soll eine Betrachtung zweier prototypischer Motorradsimulatorenausbaustufen stattfinden. Ziel dabei ist eine erste Einschätzung der benötigten technischen Aufwände, um eine Nachbildung des Motorradfahrens in einer Simulation zu ermöglichen.

Neben der fahrdynamischen Umsetzung, wird das Fahrverhalten in der jeweiligen Umgebung und die erlebte Beanspruchung der Fahrer betrachtet, wodurch bereits erste Aussagen über die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Ausbaustufen getroffen werden können.

In einer weiteren Untersuchung werden die Minimalszenarien zu komplexeren Fahraufgaben kombiniert. Hierdurch wird die eingangs postulierte Annahme überprüft, ob eine Kombinierbarkeit der identifizierten Minimalszenarien zurück zu komplexeren Aufgaben möglich ist. Im Rahmen dieser Studie wird eine repräsentative Stichprobe von Normalfahrern verwendet, um keine Expertiseeffekte (also eine übermäßig hohe Leistung auf Basis sehr hoher Gewöhnung an einen Simulator) auf das Verhalten des Fahrers zu haben (VGL. ESPIÉ ET AL., 2005).

In den folgenden Teilkapiteln wird die Methodik im Detail erläutert. Hierfür werden zunächst die Annahmen der Methodik konkretisiert. Darauf folgend werden die erarbeiteten Minimalszenarien vorgestellt. Abschließend werden Möglichkeiten zur Validitätsbeurteilung vorgestellt.

## 3.2 Definition der Minimalszenarien

Entsprechend der Annahmen, die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt wurden, soll im folgenden Teilkapitel die Erarbeitung der Minimalszenarien erläutert werden. Hierzu wird die grundlegende Logik erläutert, mit deren Hilfe eine Erarbeitung von Minimalszenarien ermöglicht wird, die den geplanten Anwendungsfeldern des zu validierenden Simulators entsprechen.

Der erste Schritt besteht in der Identifikation der relevanten Anwendungsfelder, für die der Simulator in Frage kommt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die erstellte Liste möglichst vollständig ist, dass also alle relevanten Situationen abgedeckt sind. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein bestehendes, etabliertes Klassifikationssystem verwendet und bei Bedarf ergänzt. Im Falle des vorliegenden Projekts wurde zu diesem Zweck der Unfallursachenkatalog analysiert, der bei der polizeilichen Aufnahme von Unfällen zum Einsatz kommt. Der gewählte Katalog eignet sich in besonderem Maße für das vorliegende Projekt, da davon ausgegangen werden kann, dass in diesem etablierten System alle Fahrsituationen enthalten sind, die für die Beschreibung des Motorradfahrens (und somit auch der Simulation) relevant sind. Die resultierende Liste an Fahrsituationen dient als Basis für die Analyse der Minimalszenarien, welche im vorangehenden Abschnitt an einem Beispiel erörtert wurde.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, besteht neben der Annahme, dass komplexe Fahraufgaben in Minimalszenarien zerlegt werden können die These, dass diese so definiert werden müssen, dass zu einem Zeitpunkt nur ein Minimalszenario auftreten kann. Diese Anforderung muss bei der Zerlegung von Fahraufgaben in ihre minimalen Bestandteile erfüllt sein. Es ist anzumerken, dass die so erarbeitete Liste an Minimalszenarien keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sondern sich lediglich aus dem jeweils betrachteten Anwendungsfällen ergibt.

Es ist daher nicht auszuschließen, dass mit verschiedenen Forschungsschwerpunkten unterschiedliche Minimalszenarien identifiziert werden. Im vorliegenden Projekt wurde bei der Analyse der Anwendungsfälle folgende Zusammenstellung an Minimalszenarien identifiziert, mit der sämtliche erarbeitete Fahrsituationen rekombiniert werden können (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Übersicht der identifizierten Minimalszenarien

	<b>Minimalszenarien</b>
0	Anfahren
1	konstante Geradeausfahrt
2	Folgefahren konstante Geschwindigkeit
3	Zielbeschleunigung
4	Zielbremsung (in Stand)
5	Anpassungsbremung
6	konstante Kreisfahrt (konstante Geschwindigkeit)
7	Kurve einleiten (konstante Geschwindigkeit)
8	Kurve ausleiten (konstante Geschwindigkeit)
9	Bremung beim Kurveinleiten
10	Beschleunigen beim Kurveinleiten
11	Bremung beim Kurveausleiten
12	Beschleunigen beim Kurveausleiten
13	Bremung in konstanter Kreisfahrt
14	Beschleunigung in konstanter Kreisfahrt
	Farbschema: <i>Geradeausfahrt</i> , <i>Kurvenfahrt</i> , <i>Kreisfahrt</i>

### 3.3 Validitätsbewertung

Die vorgestellte Methode der Minimalszenarienanalyse erfordert nach wie vor eine Beurteilung der Validität. Diese Validitätsbewertung kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden, die im Folgenden erläutert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet werden.

- Auf Ebene der **physikalischen Validität** und der **Verhaltensvalidität**:
  - qualitative Analyse der Fahrdatenverläufe
    - **Ziel:** Identifikation von charakteristischem Fahrerverhalten in der jeweiligen Versuchsumgebung über verschiedene Fahrer hinweg, oder charakteristisches Verhalten des einzelnen Fahrers über alle Umgebungen hinweg.
    - **Einschränkungen:** Hoher Analyseaufwand, da jeder Verlauf einzeln untersucht werden muss; eingeschränkte Objektivierbarkeit.
  - inferenzstatistische Betrachtung aggregierter Maße auf Basis der Fahrdatenverläufe
    - **Ziel:** Identifikation von Abweichungen auf Basis aggregierter; standardisierter Maße (z.B. Mittelwerte, Streuungsmaße, Änderungsraten, Häufigkeiten).
    - **Einschränkungen:** Zusammenhänge werden nur auf makroskopischer Ebene abgebildet; potenziell relevante Details in den Fahrdatenverläufen werden nicht abgebildet.
  - korrelative Betrachtung der Fahrdatenverläufe oder aggregierter Maße
    - **Ziel:** Identifikation eines signifikanten Zusammenhangs zwischen dem gezeigten Fahrverhalten in der Realfahrt und der Simulation unabhängig von den jeweiligen Absolutwerten.
    - **Einschränkungen:** Zusammenhänge werden nur auf makroskopischer Ebene abgebildet; potenziell relevante Details in den Fahrdatenverläufen werden nicht abgebildet.
- Auf Ebene der **Beanspruchungsvalidität**:
  - Relative Übereinstimmung objektiver Maße:
    - **Ziel:** Identifikation der Übereinstimmung der gemessenen Beanspruchung der Fahrer in der Realfahrt und der Simulation
    - **Einschränkungen:** Effekte der Beanspruchung können einen unterschiedlichen Ursprung haben und müssen nicht direkt auf die Fahraufgabe rückführbar sein.
  - Relative Übereinstimmung subjektiver Maße:
    - **Ziel:** Identifikation der Übereinstimmung der erlebten Beanspruchung der Fahrer in der Realfahrt und der Simulation
    - **Einschränkungen:** Die Befragungsergebnisse können durch Faktoren wie bspw. soziale Erwünschtheit verzerrt sein.

Entsprechend der großen Bandbreite möglicher Anwendungsfelder (z.B. HMI-Untersuchung in der Stadtfahrt vs. hochdynamische Manöver auf einer Rennstrecke), die in der Motorradsimulation untersucht werden können, ist eine einheitliche Definition der Validitätskriterien schwer möglich. Je nach Fokus der zu untersuchenden Fragestellung variiert die Relevanz der Validitätsebenen, welche mit unterschiedlichem Anspruch erfüllt werden müssen (sog. aufgabenbezogene Validität). Abseits der globalen Validitätsanforderungen nach Anwendungsfeldern muss für jedes Untersuchungsszenario auf Basis der überprüften Minimalszenarien entschieden werden, ob eine hinreichend valide Darstellung für den gewünschten Untersuchungsgegenstand möglich ist. Es lassen sich folglich keine globalen Validitätskriterien identifizieren, die der Vielfalt an möglichen Fragestellungen gerecht werden. Vielmehr muss für jede Studie im Vorfeld entschieden werden, ob die benötigten Minimalszenarien mit hinreichender Güte abgebildet werden können.

Im vorliegenden Projekt wurden hauptsächlich qualitative Analysen herangezogen. Grund hierfür sind die kleinen Stichprobengrößen, die für die erste Überprüfung der neuentwickelten Methode im Rahmen der Studien herangezogen wurden. Abschließende Aussagen im Sinne statistischer Urteile können hierdurch bislang nicht getroffen werden. Die qualitativen Analysen fokussieren im vorliegenden Projekt daher auf systematische Unterschiede zwischen den Versuchsumgebungen und deren inhaltlichen Relevanz für die definierten Anwendungsfälle.

Die Probandenstudie, welche die Kombinierbarkeit der Minimalszenarien überprüft, wurde mit einer größeren Stichprobe durchgeführt. Die qualitative Datenanalyse wurde daher um eine inferenzstatistische Betrachtung aggregierter Maße ergänzt.

## 4 Verifikation der Simulatoren anhand der Minimalszenarien

Nachdem die Methodik im vorangegangenen Kapitel im Allgemeinen vorgestellt wurde, wird im folgenden Kapitel das Vorgehen bei der Durchführung der Verifikationsstudie und deren Ergebnisse vorgestellt. Diese dient – wie bereits in Kapitel 3 erörtert – der Betrachtung der Simulatoreigenschaften in den Minimalszenarien.

### 4.1 Methodik der Verifikationsstudie

Nachfolgend werden die für die Durchführung der Verifikationsstudie relevanten Grundlagen erläutert. Neben Messaufbauten und Messgrößen wird auf die Auswahl der untersuchten Minimalszenarien und deren Zusammensetzung zu Sequenzen eingegangen. Abschließend erfolgt eine Beschreibung des Probandenkollektivs und des Ablaufs der Studie.

#### 4.1.1 Messaufbau

Für die Durchführung der Verifikationsstudie wurden ein reales Messmotorrad des Typs Honda NC700X sowie der dynamische und der statische Motorradfahrersimulator der WIVW GmbH verwendet.



Bild 4-1: Dynamischer „DESMORI“-Simulator (links), Honda NC700X mit Messtechnik (Mitte),

#### Kurzbeschreibung Messmotorrad

Für die Durchführung der Messungen im Realversuch steht am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt ein Messmotorrad vom Typ HONDA NC700X zur Verfügung (Bild 4-2). Das Messmotorrad wurde erstmalig von HELLMANN (2014) in Betrieb genommen und erfuhr seitdem Überarbeitungen hinsichtlich der verbauten Sensorik und Aktorik. Das Fahrzeug hat eine Leistung von 48 PS. Das im Fahrzeug verbaute Helmfach ermöglicht die kompakte Integration von Messrechner, Analog/ Digital-Wandler und weiterer Peripherie.



Bild 4-2: Honda NC700X (links); Detailaufnahme der Messtechnik im Helm-fach (rechts).

Mit Hilfe der Messtechnik kann eine große Bandbreite an Parametern untersucht werden, die sich in die folgenden Kategorien einteilen lassen: Messung von Fahrzeugzuständen, Messung der Fahrzeugposition, Messung von Fahrereingaben. Die Erfassung aller Sensordaten findet zeitlich synchronisiert über eine Messkarte von National Instruments statt.

### Kurzbeschreibung dynamischer DESMORI-Motorradsimulator

Der dynamische DESMORI-Motorradsimulator ist mit einer BMW F 800S als Mockup ausgestattet, welche auf einen hydraulischen Hexapoden zur Bewegungsdarstellung montiert ist (Bild 4-3). Das Mockup ermöglicht eine Fahrer-Fahrzeug-Interaktion unter Verwendung der gewohnten, realen Bedienelemente (z.B. Original-Lenker, Bremshebel/ Fußbremse, Kupplung, Schalthebel etc.). Der Fahrsimulator verfügt des Weiteren über eine manuelle Sechsgangschaltung. Lenkmomente bis zu einer Höhe von 80 Nm werden mit Hilfe eines elektrischen Aktors an den Fahrer rückgemeldet.



Bild 4-3: Dynamischer DESMORI Motorradsimulator des WIVW.

Das Manövrieren des Motorrads erfolgt hierbei über eine Kombination von Lenkmoment und fahrerinduziertem Rollmoment, welches z.B. durch Gewichtsverlagerung des Aufsassen entsteht. Die zylindrische Leinwand mit einem Durchmesser von 4.5 m und 2.8 m Höhe eröffnet ein horizontales Sichtfeld von 220°. Des Weiteren ist die Projektionsfläche durch eine horizontale Plattform ergänzt, die sich auf Höhe des theoretischen Radaufstandspunktes des Mockups befindet und hierdurch dem Fahrer eine bessere räumliche Verortung ermöglichen soll (in Bild 4-3 nicht enthalten). Die beiden Rückspiegel werden durch 7" TFT-Displays dargestellt, während für die Darstellung des Kombiinstrumentes ein 10" TFT-Touchdisplay eingesetzt wird. In der Standarddarstellung enthält dieses die Geschwindigkeits-, Drehzahl- und Ganganzeige. Abhängig von der Fragestellung kann das Display jedoch frei konfiguriert werden, um bspw. visuelle Warnungen darzubieten. Mittels eines Motorradhelms, der mit einem Sennheiser HD410 Kopfhörer (Frequenzgang: 20 Hz - 20 kHz, Impedanz: 32  $\Omega$ , Schalldruck: 108 dB) ausgestattet ist, wird dem Fahrer akustische Rückmeldung über Motor- und Windgeräusche, Umgebungsverkehr und Umwelteinflüsse gegeben. Die Daten für die Soundsimulation wurden mit einem 1170 ccm Viertaktmotor in unterschiedlichen Last- und Drehzahlbereichen an einem Motorrad-Akustikprüfstand aufgezeichnet. Darüber hinaus wird eine modifizierte Motorrad-Airbag-Weste (Motoairbag<sup>®</sup>) mit luftgefüllten Elementen eingesetzt. Über einen Seilzugmechanismus wird darüber dem Fahrer propriozeptives Feedback für Beschleunigungen, Verzögerungen, Geschwindigkeit und statische Windlast dargeboten. Hierbei können Kräfte bis zu 300 N mittels eines elektrischen Aktors übertragen werden. Der Simulator wird mit der Simulationssoftware SILAB<sup>®</sup> betrieben.

In SILAB<sup>®</sup> werden alle Mechatronik- und Softwarekomponenten zusammengeführt. Es dient der synchronen Kommunikation zwischen Sensoren, Aktoren, Reglern und nicht zuletzt dem Fahrdynamikmodell. Am DESMORI Motorradfahrsimulator kommt als Fahrdynamikmodell Bike Real Time (BRT) von VI-grade zum Einsatz, welches auf der Mehrkörpersimulationssoftware MSC ADAMS basiert. Die Parametrierung des Modells basiert auf geometrischen Größen, Massen und Trägheiten einer Honda NC700 und verfügt demnach über einen Motor mit etwa 48 PS. Das Fahrdynamikmodell wird in einer Co-Simulation mit Matlab/Simulink betrieben, worin bspw. auch der Motion Cueing Algorithmus (MCA) implementiert ist. Das gesamte Simulink-Modell wird in ausführbarem C-Code kompiliert, welcher dann in SILAB<sup>®</sup> eingebettet wird. So kann bspw. ein realer Lenkwinkelsensor mit dem virtuellen Fahrzeug kommunizieren und ein virtueller Rollwinkel auf den realen Hexapoden aufgebracht werden. Der Aufbau ist in Bild 4-4 schematisch dargestellt und zeigt, wie der reale Aufsasse mit dem virtuellen Fahrzeug interagieren kann. Ziel ist, dass alle Reize, die der Fahrer wahrnimmt, aus der virtuellen Umgebung und der angesteuerten Aktorik (Lenkung, Bewegungs-

, Sicht- und Soundsystem) stammen. Eine Wahrnehmung von realen Umgebungsreizen des Labors kann dabei jedoch nahezu nie vollständig verhindert werden.

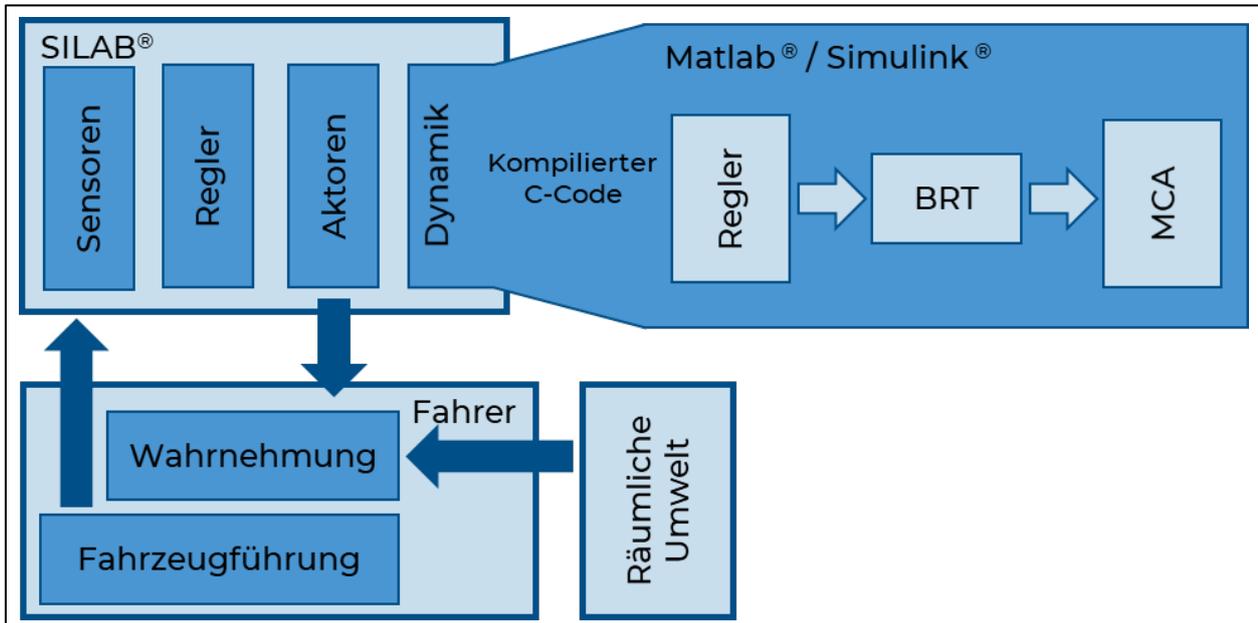


Bild 4-4: Schematischer Aufbau der DESMORI IT-Umgebung

Alle Fahrereingaben (z.B. aufgebracht Lenkmoment, induziertes Rollmoment, Gasdrehgriffstellung usw.) und fahrdynamischen Parameter (z.B. laterale Position, Beschleunigung, Geschwindigkeit usw.) werden mit 120 Hz aufgezeichnet. Flexible Schnittstellen ermöglichen die zeitsynchrone Aufzeichnung von Blick- oder auch physiologischen Daten.

#### Kurzbeschreibung statischer Motorradsimulator

Der statische Motorradsimulator (Bild 4-5) verfügt über ein horizontales Sichtfeld von 180°. Die virtuelle Welt wird hierfür über drei 55" LCD-Bildschirme dargestellt. Das Mockup besteht aus einem Motorrad des Typs KTM 1290 SuperAdventure R, welche aufrechtstehend auf einer Bodenplatte fixiert steht. Es ist somit nicht in der Lage zu kippen, auch wenn ein Proband dies mutwillig versuchen würde. Auf einem im Cockpit angebrachten 10" LCD-Display können Tachoeinheit, Navigation bzw. flexible HMI-Lösungen dargestellt werden.



Bild 4-5: Statischer Motorradsimulator.

Der rückwärtige Verkehr wird über zwei 7“ TFT-Monitore dargeboten, welche zur Spiegelsimulation dienen. Alle Bedienelemente werden mit einer Aufzeichnungsrate von 120 Hz erfasst und stehen als digitale Messwerte zur Verfügung. Hierzu zählen das vom Fahrer aufgebrachte Lenkmoment, der gestellte Lenkwinkel, die Gasdrehgriffstellung und der aufgebrachte Druck an der Vorder- und Hinterradbremse. Eine Einbindung der Kupplung und des Schalthebels erfolgt nicht, da in der Simulation ein Motorrad mit Automatikgetriebe dargestellt wird. Im Gegensatz zur aufwändigen Mehrkörpersimulation am DESMORI-Motorradsimulator ist hier lediglich ein vereinfachtes Einspurmodell hinterlegt, wie es häufig in der Fahrdynamiksimulation herangezogen wird, wenn die Fragestellungen es erlauben (z.B. wenn keine Fahrwerkseinflüsse oder andere hochfrequente Effekte wie Vibrationen abgebildet werden müssen). Es ist direkt als maschinenlesbarer Code innerhalb von SILAB<sup>®</sup> implementiert. Das Modell entspricht mit einer Masse von 237 kg und einer Leistung von etwa 100 PS einem großen Tourenmotorrad, was dem genutzten Mockup entspricht. Der vereinfachten Modellierung geschuldet ist die Lenkung am statischen Motorradsimulator als reines Positive-Steering umgesetzt. Folglich lenkt der Fahrer immer in die Richtung, in die er fahren möchte. Dies entspricht häufig den Erwartungen der Fahrer am statischen Motorradsimulator, jedoch nicht der realen Motorradfahrdynamik, bei der üblicherweise ein Lenkimpuls in die entgegengesetzte Richtung stattfindet, wodurch die Rollbewegung in die gewünschte Richtung – und damit die Kurvenfahrt – eingeleitet wird (sog. Counter-Steering). Wenngleich die Vereinfachungen im Modell zu einer verminderten Darstellungsgüte führen, helfen sie jedoch bei der Kontrollierbarkeit des modellierten Fahrzeuges, da bspw. keine (Kipp-)Instabilitäten durch den Aufsassen stabilisiert werden müssen. Die Darstellung des Fahrzeugrollwinkels erfolgt allein über eine skalierte Drehung des simulierten Bildes um die Fahrzeuglängsachse, das Mockup selbst bietet, wie oben beschrieben, keine Möglichkeit zur mechanischen Abbildung von Rollwinkeln. Zur Darstellung der akustischen Rückmeldung des Umgebungsverkehrs und der eigenen Motor- und Fahrgeräusche dienen Versuchshelme mit integrierten Kopfhörern.

#### 4.1.2 Messgrößen

Im Folgenden werden die aufgezeichneten Messgrößen vorgestellt, die zur Betrachtung der physikalischen Validität, der Verhaltensvalidität und der Validität auf Beanspruchungsebene herangezogen werden. In allen Versuchsumgebungen wurden Messgrößen zur Fahrdynamik und zum Verhalten des Fahrers aufgezeichnet. Eine Übersicht der verwendeten Variablen, die ausgewählt wurden, da sie fahrdynamische Kernparameter für das Motorradfahren darstellen, wird im Folgenden gegeben (Tabelle 4-1):

Tabelle 4-1: Überblick der fahrdynamischen Messgrößen, die im Rahmen des Projekts herangezogen wurden.

Messgröße	Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Gefahrene Strecke	s	m	Zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs in Längsrichtung
Längsgeschwindigkeit	v	km/h	Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs
Rollwinkel	$\varphi$	°	Winkel um die Fahrzeuglängsachse / Schräglage
Rollrate	$\dot{\varphi}$	°/s	Änderungsrate des Winkels um die Fahrzeuglängsachse / Schräglage
Lenkwinkel	$\delta$	°	Verdrehwinkel der Vorderradgabel relativ zum Hauptrahmen des Motorrads um die Lenkachse
Lenkmoment	$T_\delta$	Nm	Moment am Lenkerende
Gasdrehgriffstellung	$\alpha_{DK}$	°	Öffnungswinkel der Drosselklappe (verursacht durch Bewegung des Gasdrehgriffs)
Bremsdruck (Vorderrad)	$p_{b,ft}$	bar	Druck am Bremszylinder des Vorderrades
Bremsdruck (Hinterrad)	$p_{b,rr}$	bar	Druck am Bremszylinder des Hinterrades

### Peripheral Detection Task

Als Methode zur Messung der Fahrerbeanspruchung wurde der Peripheral Detection Task (PDT) verwendet. Hierbei wird im peripheren Sichtfeld des Fahrers ein visueller Stimulus dargeboten, auf den mit einem Tastendruck reagiert werden soll. Der PDT wurde als Maß zur Identifikation der Aufmerksamkeitsanforderungen während einer Fahraufgabe herangezogen (vgl. ANGELL, 2011; VAN WINSUM ET AL., 1999; MARTENS & VAN WINSUM, 2000; BULD ET AL. 2014). Für die Studie wurde eine umgebaute Motorradheadsethalterung mit einem Schwanenhals verwendet, der um eine rot leuchtende LED ergänzt wurde (Bild 4-6 links). Die Bestätigung der Wahrnehmung des Signals erfolgte über einen Taster, der am linken Lenkerende montiert war (Bild 4-6). Da es sich um einen neuen Aufbau des PDT handelt, wurde eine eigene Parametrierung im Rahmen der Vorversuche erarbeitet, die über eine feste Leuchtzeit von 1 s und einer variablen Pausenzeit von 0,8 – 1,3 s charakterisiert wird. Da mit der gleichen Hand die Kupplung bedient werden muss, wurden in der Datenauswertung Verpasser, die während einer Bedienung der Kupplung auftreten, entfernt.

Die Fahrer wurden instruiert die Fahraufgabe zu priorisieren und nur dann auf das Aufleuchten der LED zu reagieren, wenn es die Fahraufgabe gestattet. Hierdurch soll eine Gefährdung des Fahrers bei realen Fahrten ausgeschlossen werden. Als Messgröße für den PDT werden die mittlere Reaktionszeit und der Anteil verpasster Signale herangezogen.



Bild 4-6: Links: Darstellung der Vorrichtung, die für den PDT verwendet wurde. Der rote Punkt stellt die Position dar, auf die die LED eingestellt wurde, um die Ergebnisse zwischen den Fahrern vergleichbar zu machen. Rechts: Taster am linken Lenkerende der HONDA NC700X, der für die Bestätigung der Signalwahrnehmung verwendet werden sollte.

### Befragung

Im Rahmen der Verifikationsstudie wurde eine eindimensionale Befragung zur Beanspruchung des Fahrers verwendet, die sich nach der 15-stufigen Kategorienunterteilungsskala nach HELLER (1985) richtet. Diese Frage wurde gesondert für die Fahraufgabe und den Peripheral Detection Task gestellt. Zusätzlich wurde eine offene Befragung durchgeführt, die sich mit Aspekten der Fahraufgabe beschäftigt, die dem Fahrer schwergefallen sind (Bild 4-7).

Ist Ihnen bei der Bearbeitung der Aufgabe etwas schwergefallen? Wenn ja: Was ist Ihnen besonders schwergefallen?

--

Wie sehr hat Sie die **Fahraufgabe** beansprucht?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Wie sehr hat Sie die Bearbeitung des Peripheral-Detection-Task beansprucht? (**nicht möglich** □)

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Bild 4-7: Generische Darstellung der Befragung, die während des Versuchs durchgeführt wurde.

Neben der Befragung nach den Minimalszenarien wurde eine Nachbefragung ergänzt (Anhang 11.1), die den subjektiven Gesamteindruck für die beiden untersuchten Fahrsimulatoren erfasst. Der Fragebogen adressiert die erlebbaren Rückmeldungen der Simulatoren und die erlebte Präsenz. Durch die Befragung lässt sich die aus den objektiven Fahrdaten messbare Validität um das subjektive Erleben der Fahrer ergänzen. Die jeweils verwendeten Skalen sind oben genanntem Anhang zu entnehmen.

#### 4.1.3 Auswahl der Minimalszenarien und Sequenzen

Im Folgenden werden die Minimalszenarien und die daraus zusammengestellten Sequenzen beschrieben, die in der Verifikationsstudie zum Einsatz kamen. Um die Versuchsdauer auf ein vertretbares Maß zu beschränken, wurde aus den in Kapitel 3.2 genannten Szenarien eine Auswahl getroffen. Damit sollte erreicht werden, dass die Versuchsteilnehmer in ihrer Konzentrationsfähigkeit nicht überfordert werden, um hinreichend gleichmäßige Qualität der Leistungen im Versuchsverlauf zu erhalten.

Die Auswahl der Minimalszenarien richtete sich dabei nach ihrer Relevanz im alltäglichen Straßenverkehr. So entfielen bspw. Minimalszenarien wie „Beschleunigen beim Kurveeinleiten“, „Bremsen beim Kurveausleiten“ und Kurvenmanöver erhalten den Vorrang vor Manövern auf der Kreisbahn, da sie im Vergleich zu den anderen Minimalszenarien (s.u.) vergleichsweise selten auftreten.

##### Minimalszenarien

Minimalszenario 0 → Anfahren

Minimalszenario 1 → konstante Geradeausfahrt

Minimalszenario 3 → Zielbeschleunigung

Minimalszenario 4 → Zielbremsung (in Stand)

Minimalszenario 5 → Anpassungsbremung (auf Signal)

Minimalszenario 7 → Kurveeinleiten (konstante Geschwindigkeit)

Minimalszenario 8 → Kurveausleiten (konstante Geschwindigkeit)

Minimalszenario 9 → Bremsung beim Kurveeinleiten

Minimalszenario 12 → Beschleunigen beim Kurveausleiten

**Sequenzen**

Da sich die Minimalszenarien nicht in isolierter Form fahren lassen (Bsp.: Zielbremsung in den Stand ist ohne vorangehendes Fahren nicht möglich), wurden die Minimalszenarien für die Versuchsfahrten zu Sequenzen zusammengefügt. Mit Hilfe der an die Teilnehmer gerichteten Instruktion und zusätzlichen Positionsmarkern in der Versuchsumgebung (dadurch beginnen und enden Minimalszenarien an definierten Positionen), sind die Minimalszenarien für die Auswertung der Versuche isolierbar.

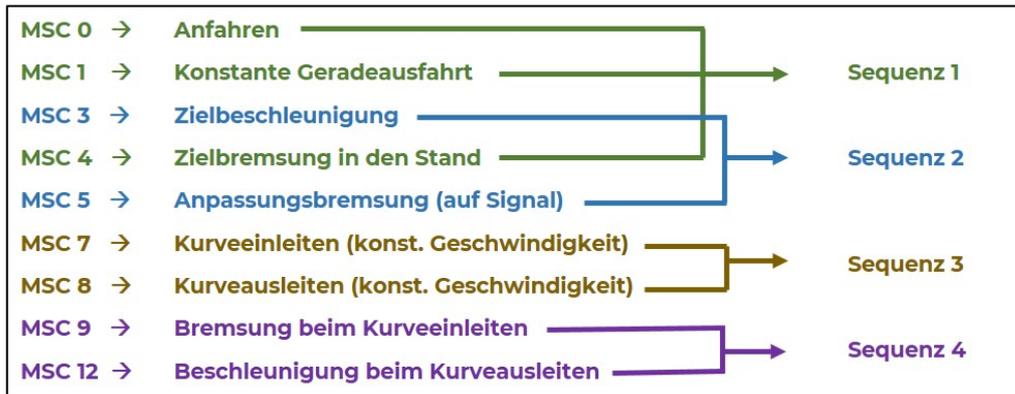


Bild 4-8: Zusammenstellung der Minimalszenarien zu Sequenzen.

Im Folgenden werden die erstellten Sequenzen und deren Variationen (Zielgeschwindigkeiten, verfügbare Strecken) vorgestellt. Die Variationen der Minimalszenarien wurden so gewählt, dass sie mit dem Realfahrzeug auf der verfügbaren Teststrecke (Bild 4-9) auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim gefahren werden konnten, ohne dass es zu kritischen, aber dennoch zu dynamischen Fahrmanövern kommt. Die gesamte Strecke wurde im Maßstab 1:1 in der Simulationssoftware SILAB nachgebildet, sodass in allen drei Versuchsumgebungen die gleiche Strecke gefahren werden konnte. Die Erhebung fand im Zeitraum von November 2018 bis April 2019 statt. Die Erhebung der Realfahrtanteile wurde witterungsbedingt im Winter unterbrochen. Aufgrund einer Streckensperrung aus Gründen des Umweltschutzes musste überdies ein Fahrer im August 2019 nacherhoben werden.

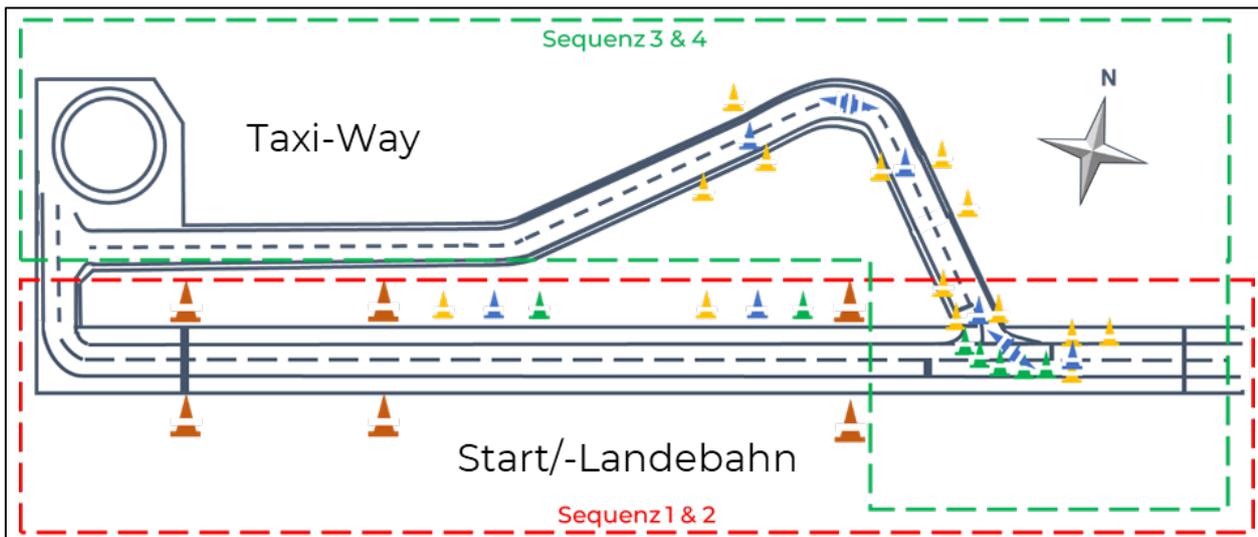


Bild 4-9: Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus, der für die Studie im Rahmen des vorliegenden Arbeitspakets verwendet wird. Farblich hervorgehoben sind der Streckenbereich für die Sequenzen 1 und 2 (rot) und für die Sequenzen 3 und 4 (grün).

Im Folgenden werden die Sequenzen beschrieben. In der daran anschließenden Tabelle 4-2 findet sich eine tabellarische Übersicht der Sequenzparametrierungen.

### Sequenz 1: Anfahren – konstante Geradeausfahrt – Zielbremsung (in Stand)

Der Fahrer durchfuhr zunächst Minimalszenario 0 (Anfahren). Er begann vom östlichen Ende der Fahrbahnmarkierung mit der Aufgabe, bis zu einem aufgestellten Pylonen (250 m nach dem Start) die instruierte Geschwindigkeit erreicht zu haben. Von diesem Punkt aus wurde Minimalszenario 1 (konstante Geradeausfahrt) bis zum nächsten aufgestellten Pylonen durchfahren (700 m nach dem Start). Nach Passieren des zweiten Pylonen begann der Fahrer mit Minimalszenario 4 (Zielbremsung in den Stand). Dabei sollte der Fahrer punktgenau am letzten Pylonen (800 m nach dem Start) zum Stehen kommen (siehe Bild 4-10). Die Aufgabenfolge wurde in permutierter Reihenfolge insgesamt dreimal durchfahren (50, 80, 110 km/h), sodass alle Abstufungen der unabhängigen Variablen eingefahren werden konnten. Neben der Aufzeichnung der zuvor spezifizierten objektiven Fahrparameter wurde der PDT während der Fahrt durchgeführt. Nach jeder der drei Sequenzen wurde die subjektive Befragung (siehe Kapitel 0) getrennt für jedes Minimalszenario ausgefüllt.

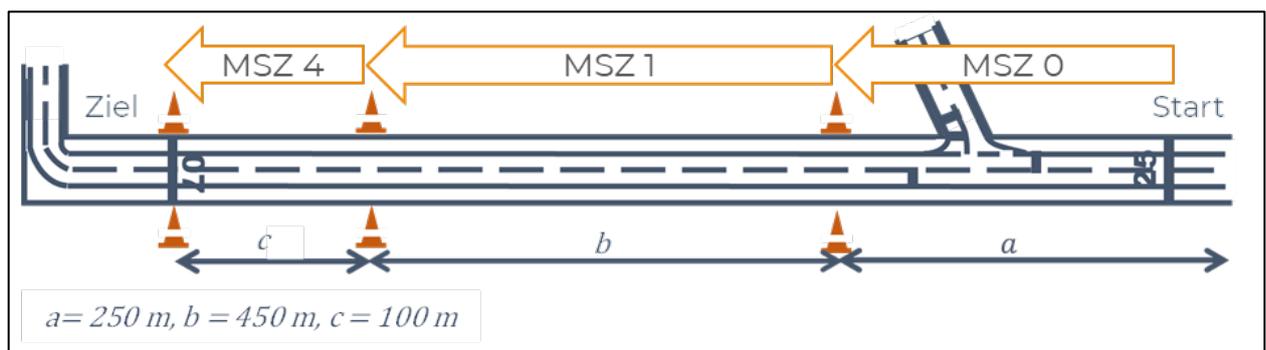


Bild 4-10: Bemaßte Skizze der ersten Sequenz.

### Sequenz 2: Zielbeschleunigung – Anpassungsbremmung

Der Fahrer fuhr vom Startpunkt an (analog zu Sequenz 1) und beschleunigte bis zum ersten Pylonen (250 m nach dem Start) auf 50 km/h. Hierbei handelte es sich nicht um ein versuchsrelevantes Minimalszenario. Das Beschleunigen auf 50 km/h bereitete lediglich das nachfolgende Manöver vor. Vom Startpunkt (Punkt ① in Bild 4-11) aus bestand die Aufgabe des Fahrers darin, bis zu einem von drei aufgestellten farbigen Pylonen (Bild 4-11) auf 100 km/h zu beschleunigen (Minimalszenario 3). Der anzufahrende Pylon wurde dem Fahrer für jede zu fahrende Sequenz vorgegeben. Die Pylonen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Position (35 m, 50 m oder 75 m) nach dem ersten Pylonen, sodass dem Fahrer jeweils eine begrenzte Strecke bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit zur Verfügung stand. Nachdem der Fahrer die Geschwindigkeit am instruierten Pylonen erreicht hatte, bestand die Aufgabe darin, bis zum nächsten Pylonen der gleichen Farbe mit konstant 100 km/h weiterzufahren. Von diesem Punkt aus verzögerte der Fahrer punktgenau von 100 auf 50 km/h (Minimalszenario 5), mit der Aufgabe, die Geschwindigkeit bis zu Punkt ② (700 m nach dem Start) erreicht zu haben (Bild 4-11). Nach Erreichen der Zielgeschwindigkeit bestand die Aufgabe des Fahrers darin selbstständig anzuhalten. Auch während dieser Sequenz wurde der PDT während der Fahraufgabe durchgeführt. Nach dem Anhalten wurde die subjektive Befragung getrennt für Minimalszenario 3 und Minimalszenario 5 erhoben. Die Sequenz wurde insgesamt dreimal je Fahrer wiederholt, sodass auf jeden Abstand je einmal beschleunigt und verzögert werden musste. Die Reihenfolge der Abstände wurde dabei permutiert.

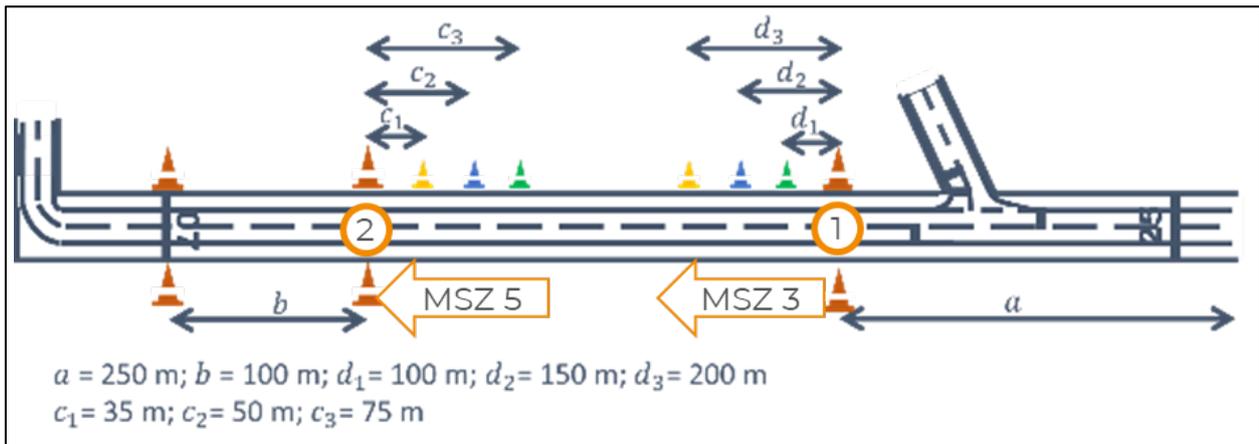


Bild 4-11: Bemaßte Skizze der zweiten Sequenz.

### Sequenz 3: Kurveinleiten (konstante Geschwindigkeit) – Kurveausleiten (konstante Geschwindigkeit)

Der Fahrer startete vom westlichen Ende des Taxi-Ways und beschleunigte auf die instruierte Geschwindigkeit (40 km/h oder 50 km/h; abhängig vom Permutationsplan). Die Aufgabe des Fahrers bestand darin, die zwei eingezeichneten Kurven (Bild 4-12) mit konstanter Geschwindigkeit zu durchfahren. Bei einem Durchgang wurde somit jeweils zweimal Minimalszenario 7 (Kurveinleiten mit konstanter Geschwindigkeit) und zweimal Minimalszenario 8 (Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit) untersucht, wobei sich die Kurvenrichtung änderte (einmal Linkskurve, einmal Rechtskurve). Durch den Verlauf der Teststrecke wurde somit bei konstanter Geschwindigkeit der zu fahrende Kurvenradius je Kurve variiert. Zusätzlich wurde die Strecke in umgekehrter Reihenfolge durchfahren<sup>6</sup>, um jeden Kurvenradius je einmal als Rechts- und einmal als Linkskurve erfasst zu haben. Als Geschwindigkeitsvarianten wurden 40 km/h und 50 km/h verwendet. Somit ergaben sich für Minimalszenario 7 und 8 jeweils acht Kurvenfahrten, die untersucht wurden. Wie in den vorangehenden Szenarien wurde der PDT während der Durchführung der Sequenz bearbeitet. Nach dem Durchfahren je Richtung wurde zusätzlich die subjektive Befragung je Kurve erhoben.

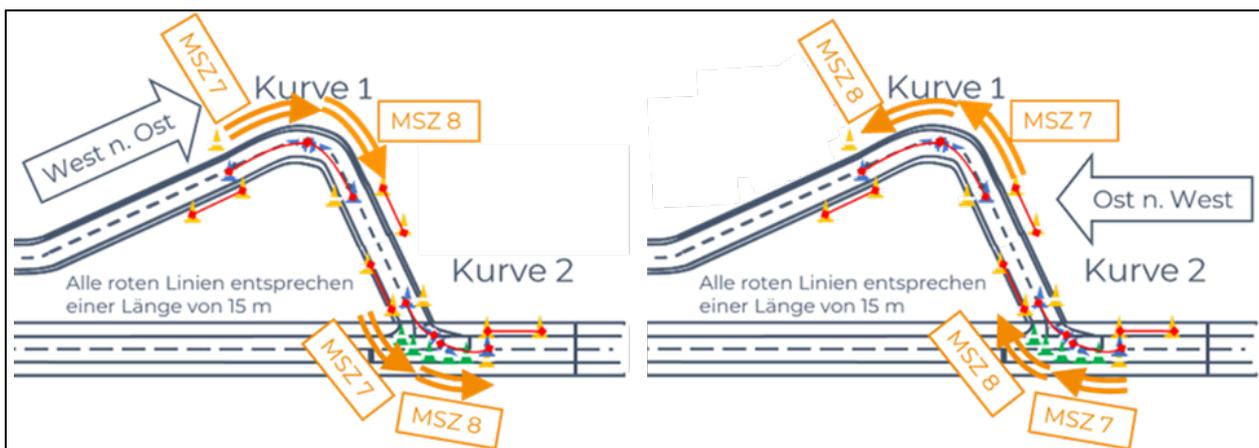


Bild 4-12: Bemaßte Skizze der dritten Sequenz.

<sup>6</sup> Der Kurvenradius verändert sich bei umgekehrter Fahrtrichtung durch Einhaltung des Rechtsverkehrs.

#### Sequenz 4: Bremsung beim Kurveeinleiten – Beschleunigung beim Kurveausleiten

Analog zu Sequenz 3 startete Sequenz 4 vom westlichen Ende des Taxi-Ways mit einer Beschleunigung auf die instruierte Geschwindigkeit (60 oder 70 km/h; abhängig vom Permutationsplan). Die Aufgabe des Fahrers bestand darin, die Geschwindigkeit während des Einleitens der Kurve auf eine selbstgewählte Geschwindigkeit zu reduzieren und während des Ausleitens der Kurve mit dem erneuten Beschleunigen auf die instruierte Geschwindigkeit zu beginnen (siehe Bild 4-12). Durch die zwei unterschiedlichen Kurvenradien wurden dem Fahrer unterschiedlich starke Verzögerungen und Beschleunigungen abverlangt. Wie in Sequenz 3, wurden auch in Sequenz 4 acht Kurvenfahrten untersucht. Die Erhebung von PDT und subjektiver Befragung fand analog zu den vorangegangenen Sequenzen statt.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der unterschiedlichen Versuchsbedingungen je Sequenz.

	Sequenz 1 (MSZ 0, 1 und 4)	Sequenz 2 (MSZ 3 und 5)	Sequenz 3 (MSZ 7 und 8)	Sequenz 4 (MSZ 9 und 12)
Bedingung 1	50 km/h	Grün <ul style="list-style-type: none"> <li>• geringste Distanz bei Beschleunigung</li> <li>• größte Distanz bei Verzögerung</li> </ul>	Fahrtrichtung West - Ost 40 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)	Fahrtrichtung West - Ost 60 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)
Bedingung 2	70 km/h	Blau <ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Distanz</li> </ul>	Fahrtrichtung Ost - West 40 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)	Fahrtrichtung Ost - West 60 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)
Bedingung 3	110 km/h	Gelb <ul style="list-style-type: none"> <li>• größte Distanz bei Beschleunigung</li> <li>• geringste Distanz bei Verzögerung</li> </ul>	Fahrtrichtung West - Ost 50 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)	Fahrtrichtung West - Ost 70 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)
Bedingung 4	---	---	Fahrtrichtung Ost - West 50 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)	Fahrtrichtung Ost - West 70 km/h (zweimal gefahren mit verschiedenen Kurvenradien)

#### 4.1.4 Probanden

An der Verifikationsstudie nahmen  $N = 6$  Fahrer teil, die aufgrund langjähriger Fahrpraxis, beruflicher Tätigkeit im Motorradsektor oder Abschlussarbeiten mit Bezug auf Motorraddynamik über fundierte Kenntnisse im Bereich der Motorradtechnik und -fahrtdynamik verfügen. Hierüber sollte sichergestellt werden, dass adäquate Rückmeldungen hinsichtlich der Umsetzung der Fahrsimulation gegeben werden konnten, die von durchschnittlichen Motorradfahrern nicht zu leisten sind. Das mittlere Alter der Teilnehmer lag bei  $m = 26,2$  Jahren ( $SD = 1,95$ ). Alle Versuchsteilnehmer waren männlich. Alle Teilnehmer verfügten zum Zeitpunkt der Untersuchung über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse A. Die Fahrleistung in den letzten 12 Monaten betrug  $m = 7\,667$  km ( $min = 2\,000$  km,  $max = 20\,000$  km,  $SD = 6\,574$  km).

#### 4.1.5 Ablauf

Die Reihenfolge der Untersuchungsumgebungen wurde zwischen den Probanden pseudorandomisiert. Die Probanden wurden bei ihrem ersten Termin über den Zweck und Ablauf der Studie, die aufgezeichneten Daten und den Umgang mit diesen, gemäß DSGVO, aufgeklärt.

Im Anschluss daran wurde, unabhängig von der Versuchsumgebung, eine freie Eingewöhnungsfahrt durchgeführt. Im Falle der Simulatorfahrten wurde zusätzlich vor der Erhebung ein kurzes Simulatortraining durchgeführt, das aus Übungen zum Anfahren und Anhalten sowie zum Kurvenfahren bestand und ca. 45 Minuten dauerte. Den Probanden sollte somit ermöglicht werden, sich an das Fahrzeug / den jeweiligen Simulator zu gewöhnen. Nach Abschluss der Eingewöhnungsfahrt wurde dem Probanden die Bearbeitung des PDT erläutert. Zur Sicherung des Verständnisses wurde dieser zunächst im Stand für die Dauer von zwei Minuten geübt. Darauffolgend wurde eine Übungsfahrt mit PDT analog zur freien Eingewöhnungsfahrt durchgeführt.

Nach Beendigung der Gewöhnung wurde mit der Instruktion und der darauffolgenden Bearbeitung der Sequenzen begonnen. Zu Beginn jeder Sequenz wurde eine Eingewöhnungsfahrt durchgeführt. Mit dieser wurde sichergestellt, dass die Probanden die durchzuführende Fahraufgabe verstanden haben. Für die Eingewöhnungsfahrt wurde für jeden Fahrer die gleiche Bedingung der jeweiligen Sequenz verwendet (z.B. Zielgeschwindigkeit 80 km/h bei Sequenz 1). Die Reihenfolge der Varianten der auszuwertenden Versuchsfahrten wurde hingegen zwischen den Probanden variiert.

Nach jeder gefahrenen Sequenzvariante wurde die Befragung durchgeführt (siehe Bild 4-7). Nach Abschluss des Versuches wurde im Falle der Simulatoren die Nachbefragung durchgeführt, die sich mit der subjektiven Wahrnehmung des Simulators beschäftigt (Lenkung, Eigenstabilisierung, Fahrdynamik, Präsenzerleben, Beurteilung von Sicht und Ton). Im Falle der Realfahrt wurde keine Nachbefragung durchgeführt.

## 4.2 Ergebnisse – Verifikationsstudie

Die Ergebnisdarstellung unterteilt sich in vier Teilkapitel, wobei in den ersten drei Teilkapiteln Eigenschaften der Simulatoren dargestellt werden, die sich über alle untersuchten Sequenzen gezeigt haben. Dabei handelt es sich im Einzelnen um Geschwindigkeitseffekte (Abschnitt 4.2.1), Stabilitätseffekte (Abschnitt 4.2.2) und Effekte auf Ebene der Fahrzeugregelung und Fahrerbeanspruchung (Abschnitt 4.2.3). Während die ersten beiden Kapitel sowohl die physikalische Validität als auch die Verhaltensvalidität adressieren, beschäftigt sich das dritte Teilkapitel mit der Verhaltensvalidität und der Validität auf Ebene der Beanspruchungsebene. Das letzte Teilkapitel behandelt die Erkenntnisse aus der Nachbefragung (Abschnitt 4.2.4), in der die beiden Simulationsumgebungen von Seiten der Untersuchungsteilnehmer beurteilt wurden.

Je beobachtetem Phänomen wird nach Möglichkeit eine Darstellung vorgestellt, die die Schar über alle Fahrer zeigt. Ergänzt wird diese um weitere Detaildarstellungen, die einzelne, exemplarische Fahrten herausgreifen, oder Daten des Probandenkollektivs aggregieren, um den jeweiligen Sachverhalt zu verdeutlichen.

#### 4.2.1 Geschwindigkeitseffekte

Mehrere untersuchte Minimalszenarien beinhalten das Herstellen bzw. Aufrechterhalten einer Zielgeschwindigkeit. Zur Einführung in die systematischen Unterschiede, die zwischen den Versuchsumgebungen auftreten, wird der Geschwindigkeitsverlauf aller Fahrer, über alle Zielgeschwindigkeiten, in allen Versuchsumgebungen für Sequenz 1 (siehe Kapitel 4.1.3) exemplarisch dargestellt (Bild 4-13). Hierbei werden von oben nach unten die drei unterschiedlichen Zielgeschwindigkeiten (50, 80 und 110 km/h) gezeigt. Die drei Versuchsumgebungen sind in den Spalten zu finden. Insbesondere in der statischen Simulation (rechte Spalte) zeigt sich über alle Zielgeschwindigkeiten hinweg ein deutliches, langes Einschwingen, bevor die Zielgeschwindigkeit erreicht wird. Ebenso zeigt sich in der statischen Simulation bei einer Zielgeschwindigkeit von 50 km/h (obere Zeile, rechte Spalte) bei der Zielbremsung in den Stand ein Sattelpunkt im Geschwindigkeitsverlauf.

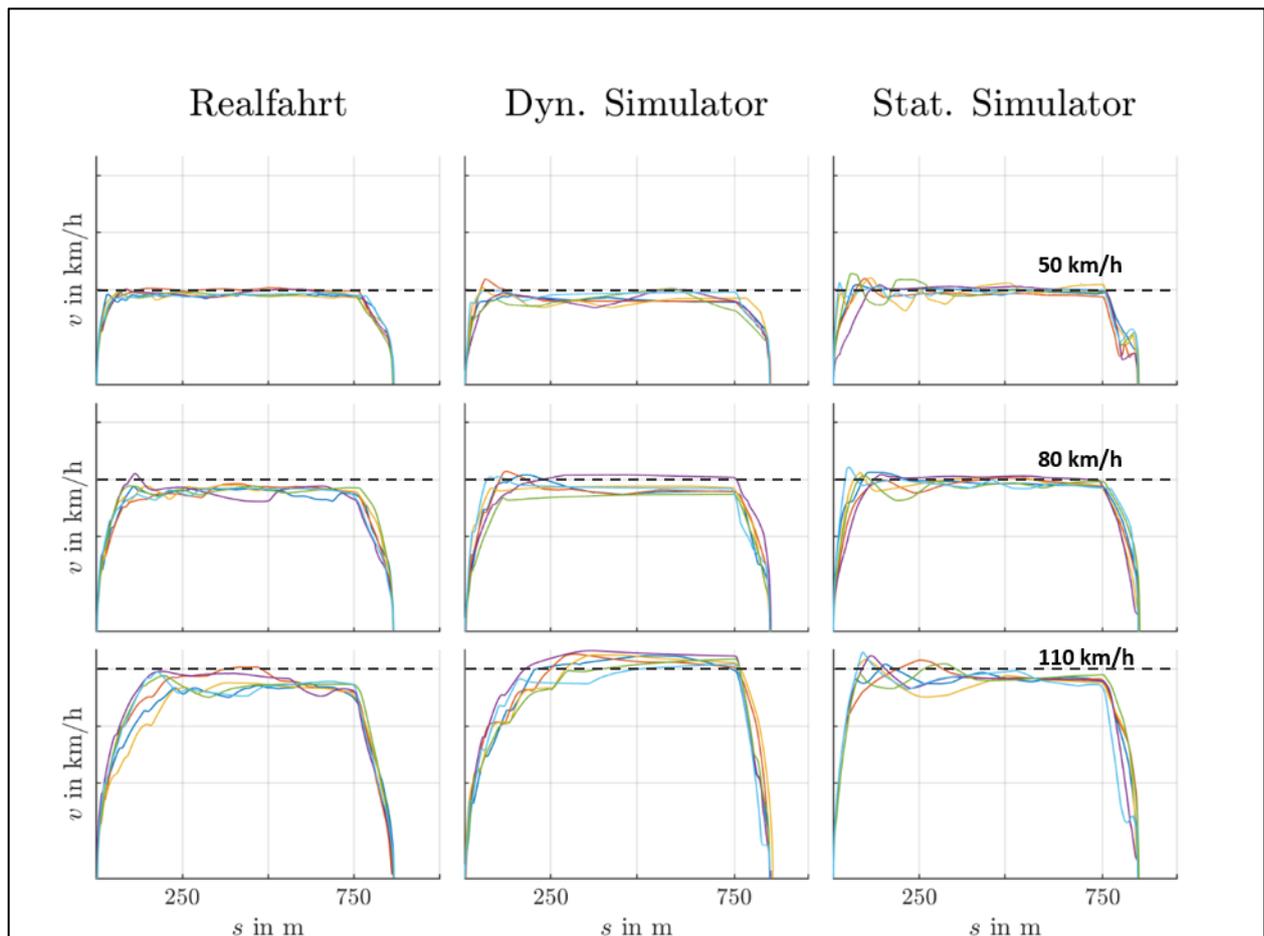


Bild 4-13: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke in Sequenz 1 (Anfahren, konstante Geradeausfahrt und Zielbremsung in den Stand). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die drei unterschiedlichen Zielgeschwindigkeiten: 50, 80 und 110 km/h und in den Spalten die drei Versuchsumgebungen. Die Gitterlinien stellen die Zielgeschwindigkeiten sowie die relevanten Start- und Endpunkte dar: Realfahrt, dynamischer Simulator und statischer Simulator.

Betrachtet man die mittlere Geschwindigkeit im Segment der konstanten Geradeausfahrt, zeigt sich bei der Zielgeschwindigkeit 50 km/h das genaueste und konstanteste Erreichen des Geschwindigkeitsniveaus in der Realfahrt und der statischen Simulation (Bild 4-14 unten). Dabei bildet der dritte Fahrer in der statischen Simulation mit erkennbar höheren Schwankungen eine Ausnahme. In der dynamischen Simulation zeigt sich ein heterogeneres Bild. Insgesamt liegt die Geschwindigkeit weiter unter der instruierten Geschwindigkeit bei teils großen Standardabweichungen. In der Bedingung 80 km/h zeigt sich anhand der größeren Standardabweichungen (Balken) eine Zunahme des Streubereichs in den Bedingungen Realfahrt und statische Simulation, während die Streuung in der dynamischen Simulation kleiner wird (Bild 4-14 Mitte).

Geringere Mittelwerte der Geschwindigkeit in der Realfahrt können ihre Ursache in auftretenden Tachoungenauigkeiten haben. Mit der Zielgeschwindigkeit 110 km/h zeigt sich eine Zunahme des Streubereichs über alle Versuchsumgebungen (Bild 4-14 oben). Während es in der dynamischen Simulation mit Ausnahme eines Fahrers zu tendenziell über der Instruktion liegenden Geschwindigkeiten kommt, liegen Realfahrt und statische Simulation leicht unter der instruierten Geschwindigkeit. Im Falle der Realfahrt kann die Ursache hierfür abermals in einer Ungenauigkeit des Tachos liegen.

Betrachtet man anhand der Boxplots das in Bild 4-13 beschriebene Einpendeln der Geschwindigkeit (in Form eines Über- und / oder Unterschwingens der Geschwindigkeit), finden sich Beispiele hierfür in allen Versuchsumgebungen. Insgesamt tritt dies jedoch häufiger und deutlicher in den beiden Simulationsumgebungen auf. Zusätzlich könnte in der Bedingung 110 km/h der Einfluss der zunehmenden Windlast ein weiterer Grund für größere Schwankungen der Geschwindigkeit sein, wofür die stark ausgeprägten Minima bei Realfahrt und dynamischer Simulation sprechen. Eine mangelnde Regelung am Gasdrehgriff führt hier zu einem größeren Geschwindigkeitsverlust, als es bei niedrigeren Geschwindigkeiten der Fall ist.

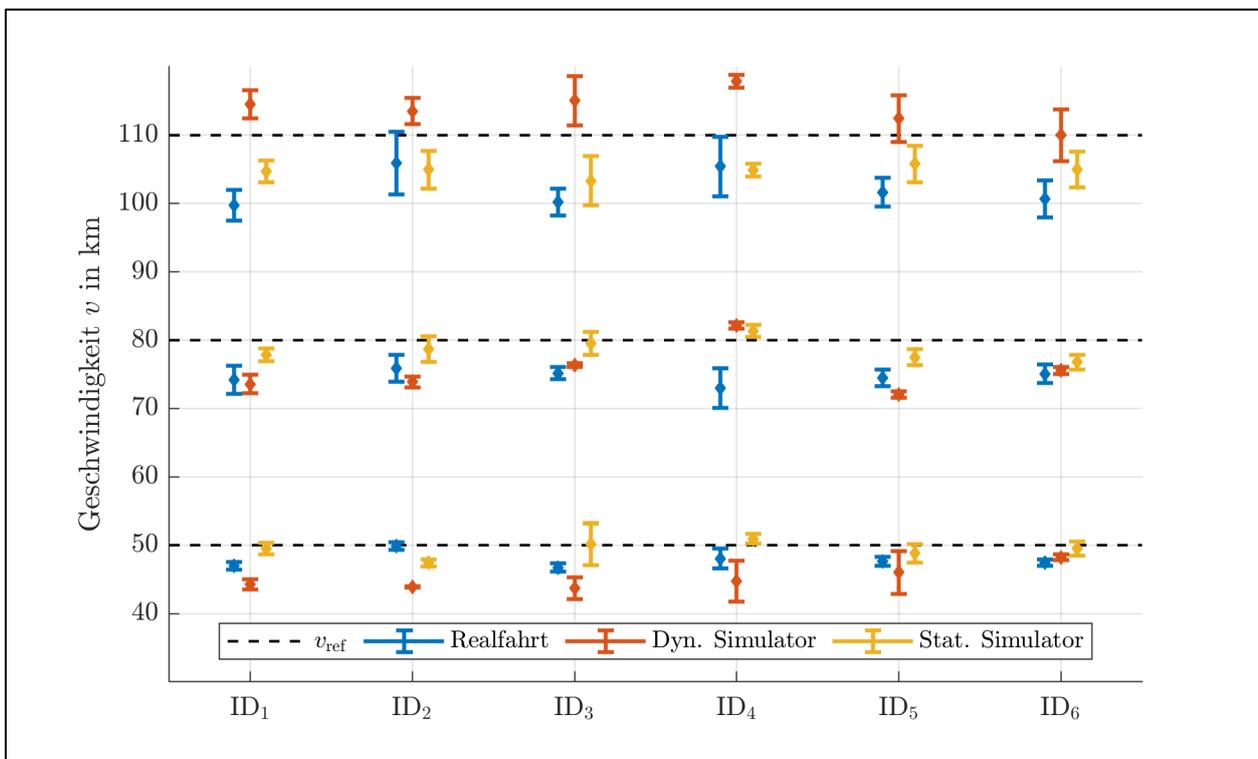


Bild 4-14: Darstellung der mittleren Geschwindigkeit und deren Standardabweichung je Fahrer ID bei konstanter Geradeausfahrt.

Betrachtet man die Geschwindigkeitseffekte in der Kurvenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, zeigt sich in der Realfahrt mit wenigen Ausnahmen kaum Varianz zwischen den Fahrern (Bild 4-15, linke Spalte). Zusätzlich lässt sich ein leichtes Absinken der Geschwindigkeit im Scheitelpunkt der Kurven erkennen, was insbesondere in den Fahrten mit 50 km/h der Fall ist (Bild 4-15, linke Spalte, Zeile 3 und 4). Die beiden Simulationsumgebungen wirken im Gegensatz dazu bezüglich der Geschwindigkeitsregelung heterogener, was sich an weniger einheitlichen Verläufen der Schar zeigt. Zusätzlich sind in den Verläufen der statischen Simulation mit einer Zielgeschwindigkeit von 40 km/h die gleichen Schwingungen der Geschwindigkeit erkennbar, die bereits bei der konstanten Geradeausfahrt ersichtlich waren (Bild 4-15, rechte Spalte, Zeile 1 und 2; vergleiche auch Bild 4-13).

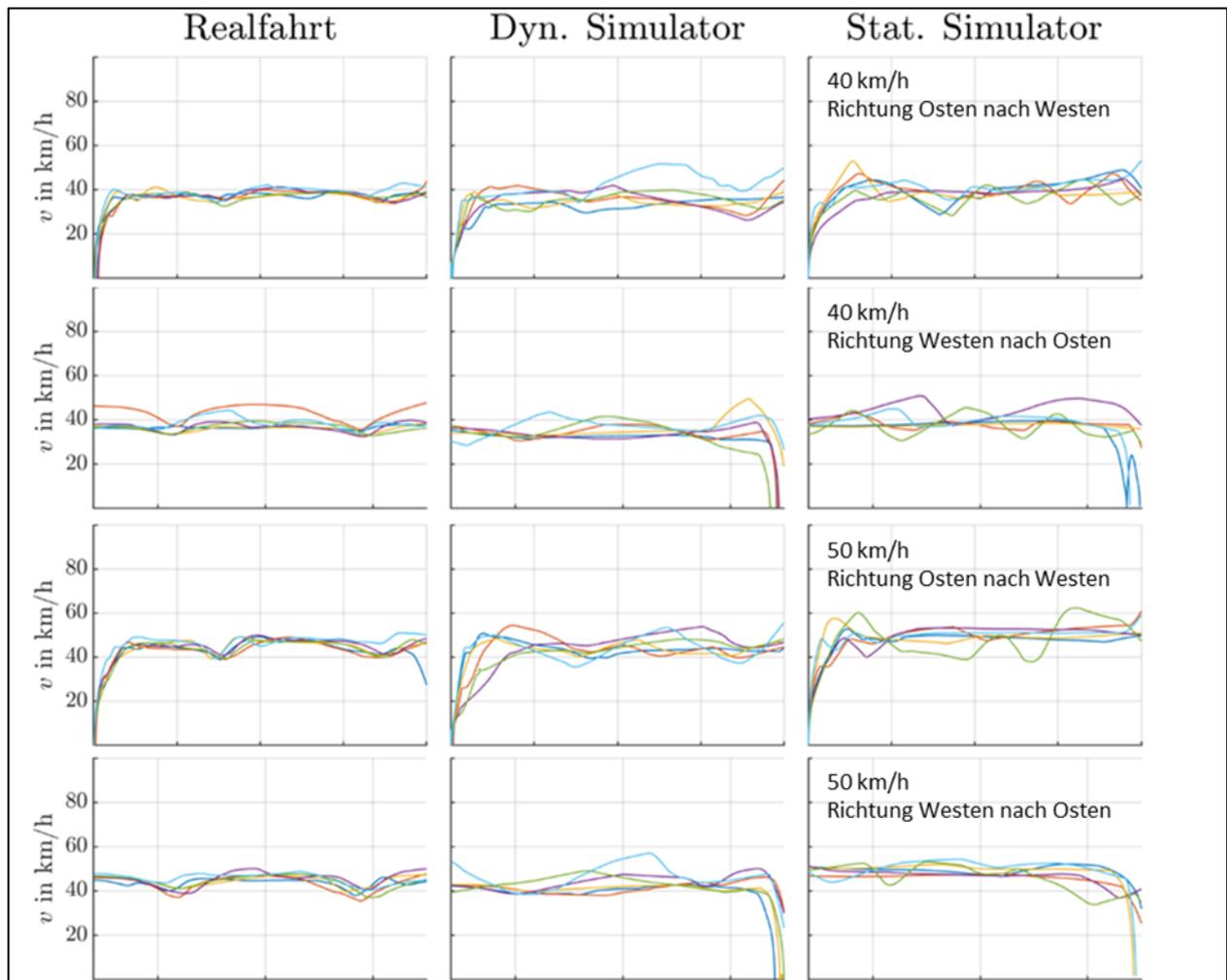


Bild 4-15: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke in Sequenz 3 (Kurveinleiten mit konstanter Geschwindigkeit und Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 40 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen, 40 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 50 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 50 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.

### Zusammenfassung der Geschwindigkeitseffekte

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Geschwindigkeitseffekte Folgendes festgehalten:

- |           |  |
|-----------|--|
| <b>G1</b> | In der Realfahrt zeigen sich interindividuell die geringsten Unterschiede in der aus den Fahreingaben resultierenden Geschwindigkeit. In der Geradeausfahrt werden die Verläufe mit zunehmender Geschwindigkeit heterogener.   |
| <b>G2</b> | In beiden Simulationsumgebungen treten Fahrten auf, in denen sich in der Geschwindigkeit lange Einpendelphasen zeigen. In der Geradeausfahrt ist dies bei der statischen Simulation am deutlichsten ausgeprägt, was in einer mangelnden Geschwindigkeitsrückmeldung durch den Simulator begründet sein kann.   |
| <b>G3</b> | In Kurvenfahrten in beiden Simulationsumgebungen bestehen große Unterschiede zwischen den Fahrern bezüglich der hergestellten Geschwindigkeit, während in der Realfahrt weitestgehend homogene Verläufe auftreten. Ursachen hierfür können in der Geschwindigkeitsrückmeldung der Simulatoren oder der Fahrdynamik des jeweiligen Simulators liegen. |

#### 4.2.2 Stabilitätseffekte

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Effekte auf die Längsgeschwindigkeit dargestellt wurden, werden im Folgenden Stabilitätseffekte betrachtet. Als Stabilitätsmaß dient der Rollwinkel (Neigung des Fahrzeugs um die Längsachse). Als Ausgangspunkt der Betrachtung soll wie bereits bei den Geschwindigkeitseffekten die konstante Geradeausfahrt herangezogen werden (Bild 4-16).

Insgesamt erscheint die Stabilisierung in allen drei Versuchsumgebungen erfolgreich zu verlaufen. Betrachtet man die zusammengefassten Ergebnisse als mittlere Rollwinkel je Fahrer, zeigt sich in der Realfahrt (Bild 4-16, blaue Balken) über alle Geschwindigkeitsstufen hinweg eine weitestgehend konstante Streuung um den Mittelwert. Hierbei fällt auf, dass das Streuungsniveau auch zwischen den einzelnen Fahrern sehr konstant bleibt. Im Falle des dynamischen Simulators (rot) zeigt sich - insbesondere zwischen den Stufen 80 km/h (Mitte) und 110 km/h (unten) - eine Abnahme der Streuung mit zunehmender Geschwindigkeit. Eine mögliche Erklärung hierfür sind geschwindigkeitsbasierte Stabilisierungseffekte im Fahrdynamikmodell. Weiterhin bleibt anzumerken, dass sich die Fahrer interindividuell deutlich unterscheiden. Während ein Teil der Fahrer auf einem ähnlichen Streuungsniveau wie in der Realfahrt agiert, kommt es bei anderen Fahrern zu erheblich höheren Streuungswerten, was auf ein von der Realfahrt abweichendes Regelverhalten auf dem Simulator hinweist, dass also die Fahrer ein von der Realfahrt abweichendes Lenkverhalten zeigen. Ebenso zeigen sich in den intraindividuellen Verläufen Unterschiede. Während es bei einem Teil der Fahrer zu Reduktionen der Streuung um den Mittelwert kommt, bleiben andere auf einem konstanten Niveau oder zeigen gar gegenläufige Effekte. Im Falle des statischen Simulators (vgl. Erläuterung zur Rollwinkel Darstellung in Kapitel 4.1.1) zeigen sich mit Ausnahme von Ausreißern in positive Richtung minimale Streuungen um den Mittelwert. Mit zunehmender Zielgeschwindigkeit nehmen diese über alle Fahrer hinweg zu. Die Begründung ist hier im hinterlegten Fahrdynamikmodell zu suchen. Es handelt sich um ein Modell, das an die Fahrdynamik eines Pkw angelehnt ist und somit nicht das (kipp-)instabile Verhalten eines Motorrads aufweist.

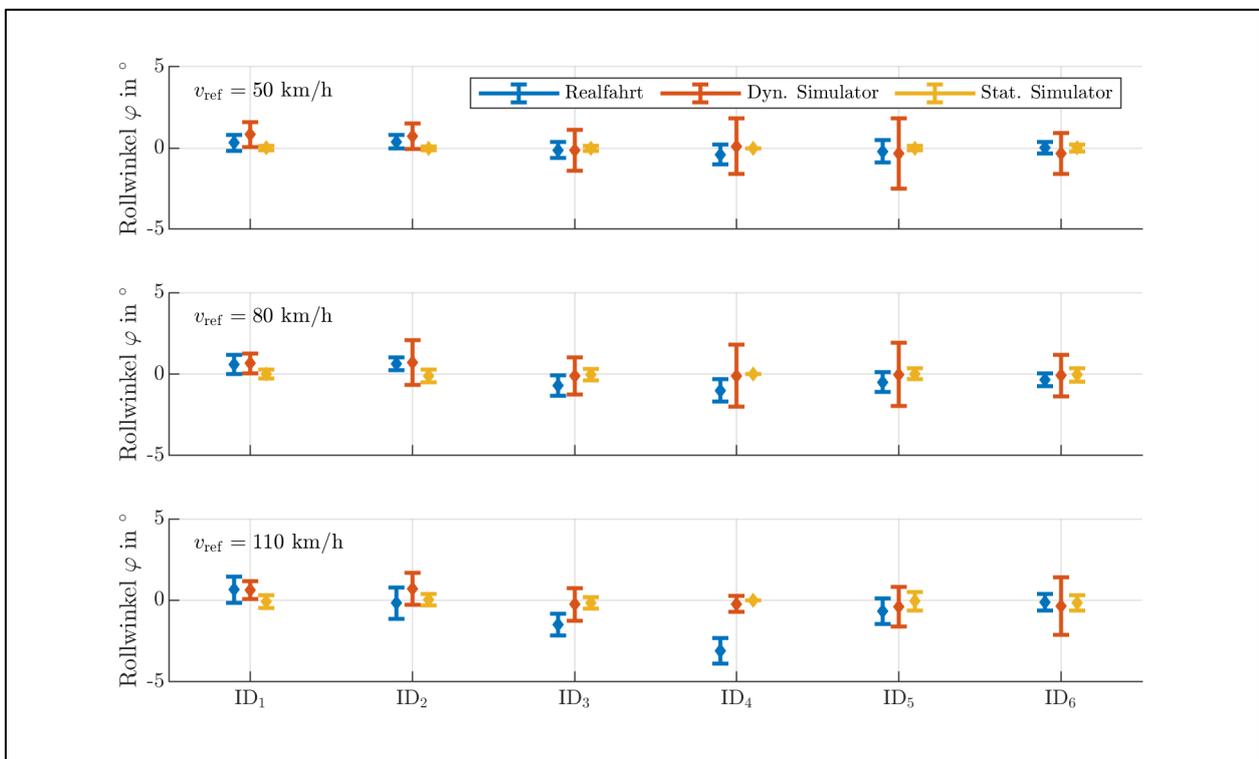


Bild 4-16: Mittlerer Rollwinkel und dessen Standardabweichung bei konstanter Geradeausfahrt je Fahrer.

Betrachtet man die Stabilitätseffekte für das Anfahren, zeigen sich für alle Versuchsumgebungen und Zielgeschwindigkeiten ähnliche Ergebnisse, wie sie bereits in der konstanten Geradeausfahrt vorlagen (Bild 4-17). Dabei sind in Realfahrt und statischer Simulation geringfügig größere Standardabweichungen zu

beobachten als in der Geradeausfahrt. In der statischen Motorradsimulation lässt sich dieses Muster aufgrund des vereinfachten Fahrdynamikmodells nicht erkennen. Die natürlich auftretenden Instabilitäten des Motorradfahrens werden hier nicht abgebildet, sodass ein Anfahren gänzlich ohne schwankende Rollwinkel möglich ist. In der dynamischen Motorradsimulation liegen wie in der Geradeausfahrt größere Streuungen des Rollwinkels vor, was sich zusätzlich interindividuell deutlich unterscheidet. Besonders große Streuungen, wie sie beim fünften dargestellten Fahrer auftreten, sprechen für einen Kontrollverlust über den Simulator.

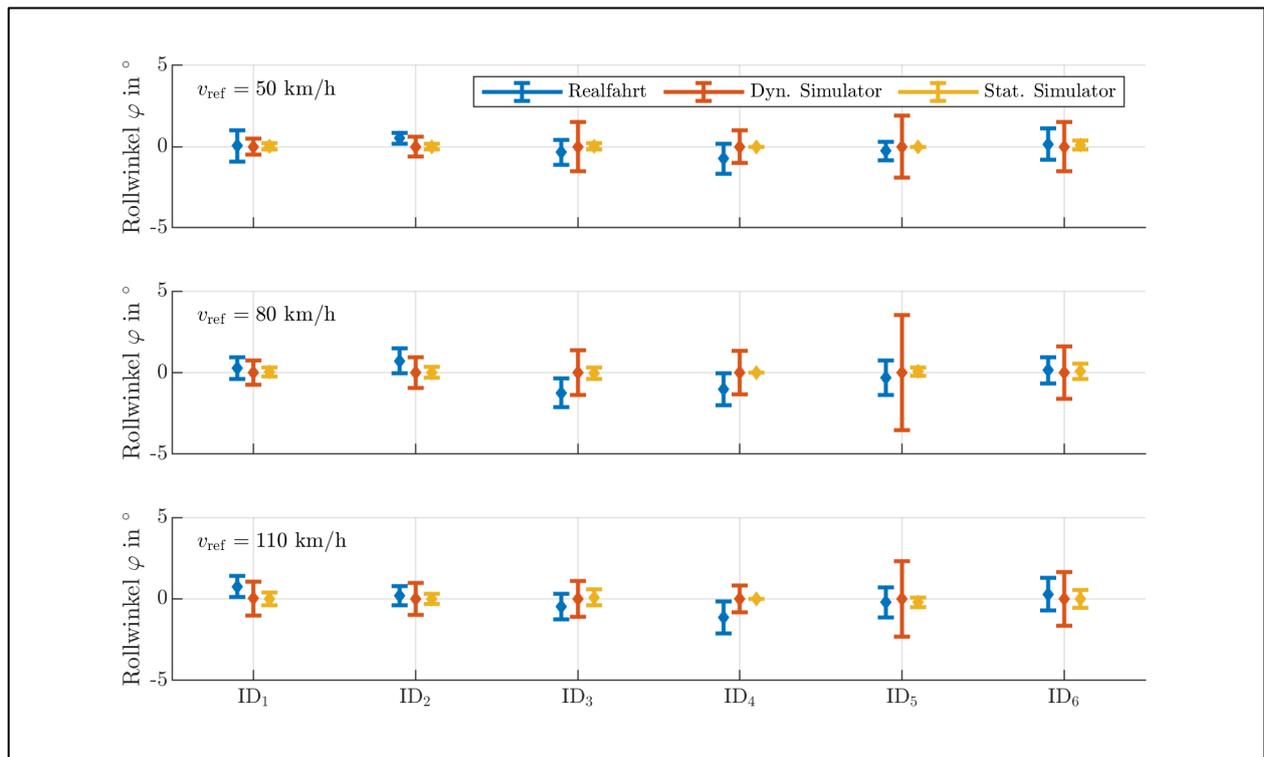


Bild 4-17: Mittlerer Rollwinkel und dessen Standardabweichung beim Anfahren aus dem Stand je Fahrer.

Nach der Betrachtung der Stabilitätseffekte in Geradeausfahrt werden im Folgenden Stabilitätseffekte in Kurvenfahrten (Sequenz 3: Kurveeinleiten mit konstanter Geschwindigkeit und Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit) betrachtet. Wie bereits in der Geradeausfahrt zeigen sich im Falle des Realfahrzeugs wenige Unterschiede zwischen den Fahrern, was über die beiden unterschiedlichen Zielgeschwindigkeiten und die beiden Fahrtrichtungen unverändert bleibt. Moderate Schwingungen des Rollwinkels treten insbesondere in den geraden Zwischenstücken auf. Während der Kurvenfahrten treten Schwingungen lediglich leicht im jeweiligen Rollwinkelmaximum je Kurve auf.

Im dynamischen Simulator zeigen sich im Vergleich zu Realfahrt insgesamt ähnlich hohe Rollwinkel, die zum Durchfahren der Kurve gewählt werden. Abweichungen treten in Richtung größerer Rollwinkel im Vergleich zur Realfahrt auf. Bereits hierbei zeigt sich eine insgesamt größere Instabilität in den Verläufen des Rollwinkels. Insgesamt treten stärkere Schwingungen des Rollwinkels auf, die in einzelnen Fällen zu großen Abweichungen des Rollwinkels im Vergleich zur Realfahrt führen, der zum Durchfahren der Kurve gewählt wird.

Derartige Rollwinkelschwankungen treten stärker bei Fahrtrichtung Westen nach Osten in der ersten Kurve auf (Bild 4-18, mittlere Spalte, Zeile 2 und 4). Dies könnte z.B. auf Fehleinschätzungen der Probanden hinsichtlich der eigenen Positionierung innerhalb der virtuellen Umgebung zurückzuführen sein. Ist es dem Fahrer z.B. aufgrund von Verzerrungen innerhalb der Projektion nicht möglich, den Abstand zu einer Kurve sowie deren Krümmung korrekt einzuschätzen, führt dies ggf. zu falsch gewählten Bremspunkten sowie plötzlich notwendigen Korrekturen von Lenk- und Rollwinkeln. Im Vergleich zu der realen Versuchsstrecke besitzt die simulierte Kurve keine kontrastreiche Grasnarbe auf der Kurveninnenseite. Zudem können Unterschiede im Höhenprofil auftreten, wodurch sich Perspektive und Einsehbarkeit der Kurve ändern.

Wie in der Realfahrt zeigen sich auch in der dynamischen Simulation Schwingungen während der geraden Segmente vor und nach den Kurven. Diese sind jedoch stärker ausgeprägt, als es in der Realfahrt der Fall ist. Vereinzelt zeigt sich ein deutliches Überschwingen nach dem Ausleiten einer Kurve (siehe z.B. Bild 4-18, mittlere Spalte, Zeile 2, orange Kurve).

Im Falle des statischen Simulators zeigt sich wie in der Geradeausfahrt ein schwingungsfreies Verhalten. Zusätzlich sind die Rollwinkel deutlich niedriger als in der Realfahrt, was aus dem verwendeten Fahrdynamikmodell resultiert. Auch folgt der Rollwinkel auf- und abbau einer anderen Form, da dieser bis zu seinem lokalen Maximum nahezu linear ansteigt und ebenso wieder abgebaut wird. Hierbei stellt sich die Abweichung der Amplitude als weniger problematisch dar, da diese über Parametrierung entsprechend angepasst werden könnte (wobei berücksichtigt werden sollte, dass es im Falle höherer Bildfrequenzen zu vermehrter Simulator-Sickness kommen kann). Die Stabilität stellt jedoch für Fragestellungen in dynamischen Grenzbereichen ein Problem dar, da Fahrmanöver, die in der Realität mit extremen haptisch / propriozeptiven Rückmeldungen verbunden wären, in der statischen Simulation durch die übermäßige Stabilität problemlos durchfahren werden können, wodurch eine adäquate Situationsbeurteilung unmöglich wird. Entsprechend muss diese Eigenschaft vor dem Einsatz des Simulators berücksichtigt werden.

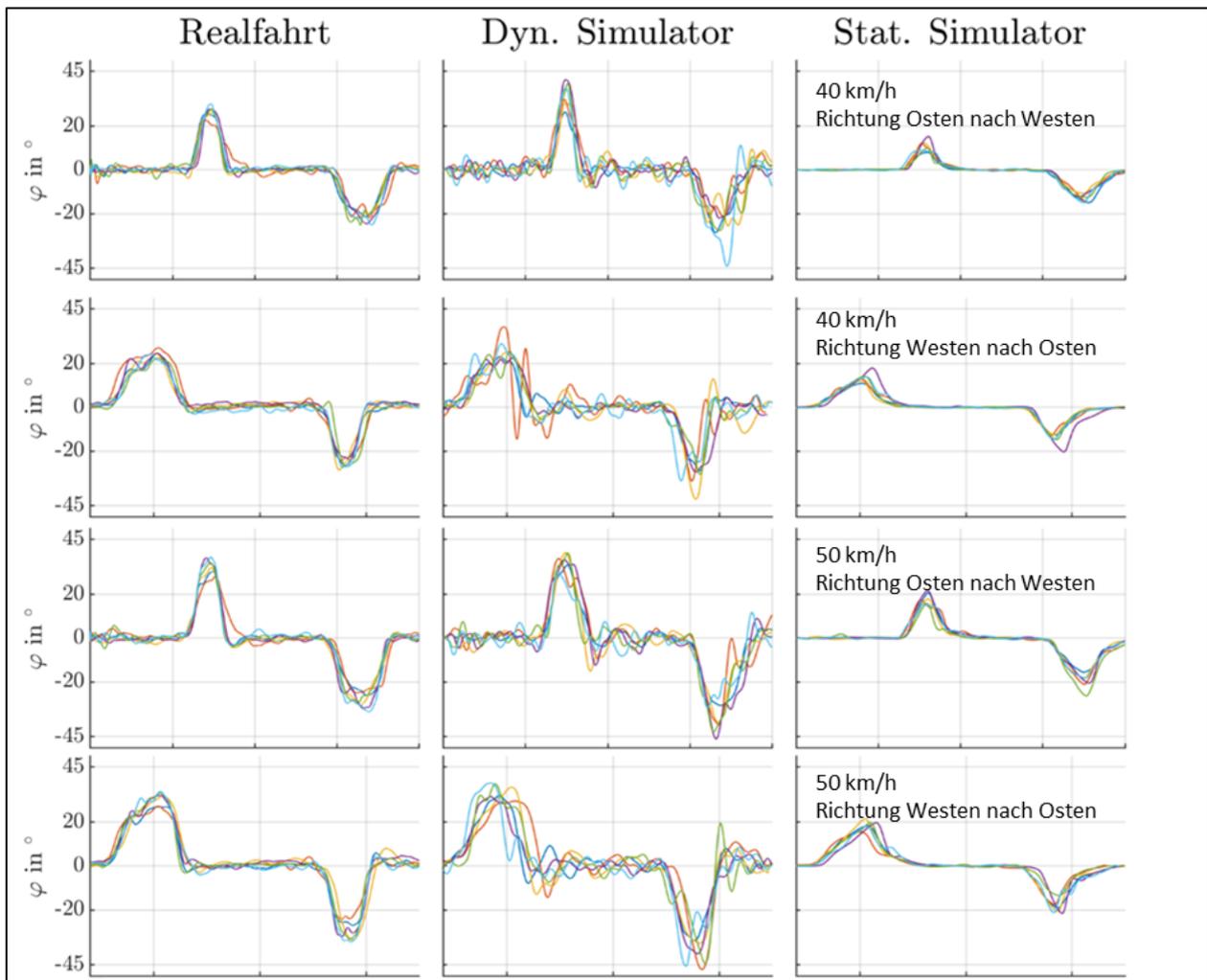


Bild 4-18: Rollwinkelverläufe über die Strecke in Sequenz 3 (Kurveeinleiten mit konstanter Geschwindigkeit und Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 40 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen, 40 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 50 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 50 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.

Betrachtet man die Rollwinkelverläufe in den dynamischen Kurvenfahrten aus Sequenz 4 (Bremsung beim Einleiten der Kurve und Beschleunigung beim Ausleiten der Kurve) zeigt sich ein vergleichbares Bild wie in den Kurvenverläufen mit konstanter Geschwindigkeit (Bild 4-19). Im Falle der dynamischen Motorradsimulation nehmen die überlagerten Schwingungen (Trajektorienkorrektur), die bereits in Bild 4-18 beschrieben wurden tendenziell weiter zu. Der hellblaue Verlauf in der Realfahrt zeigt dabei einen Probanden, welcher unter Ausnutzung der gesamten Streckenbreite in sportlicher Manier den gesteckten Parcours durchfährt. Dieser Verlauf ist für die aufgeführte Diskussion als Ausreißer zu bewerten.

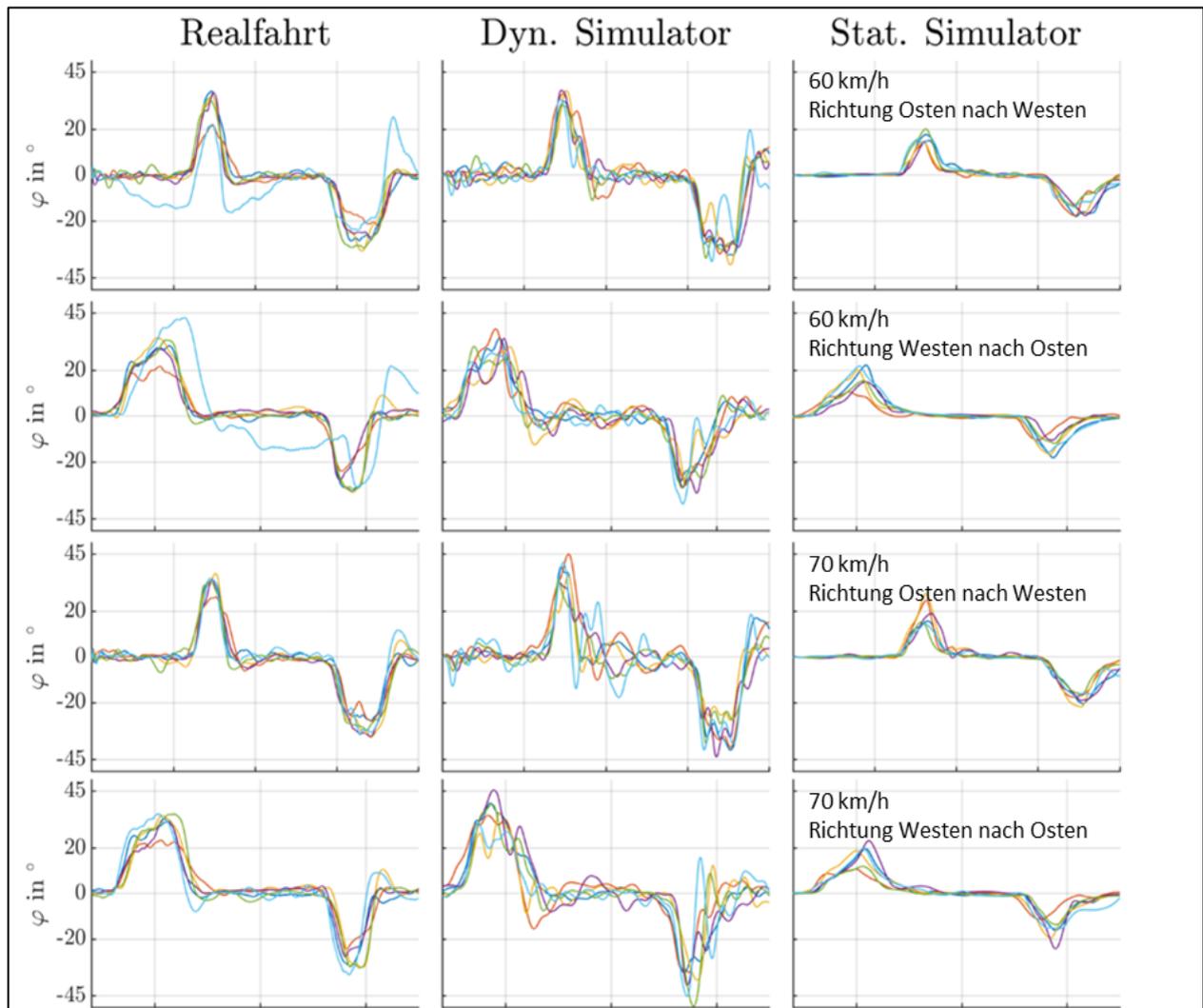


Bild 4-19: Rollwinkelverläufe über die Strecke in Sequenz 4 (Bremsung beim Einleiten der Kurve und Beschleunigung beim Ausleiten der Kurve). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 60 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen, 60 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 70 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 70 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.

Zur Darstellung des Schwingungsverhaltens wird nachfolgend das sogenannte Leistungsdichtespektrum der Rollrate bei Geradeausfahrt herangezogen (für weitere Informationen vgl. KRONMÜLLER, 1991). Das Leistungsdichtespektrum quantifiziert die Schwingstärke der betrachteten Größe in verschiedenen Frequenzen und stellt diese auf einer dB-Skala dar. Für die Rollrate als leistungsproportionale Größe entsprechen bspw. +3 dB einer Verdopplung der Rollratenamplitude bzw. -3 dB einer Halbierung der Rollratenamplitude, bezogen auf einen Referenzwert von  $1^\circ/(s^2\text{Hz})$ . Bild 4-20 zeigt die Verläufe für jeweils sechs Probanden auf dem Realfahrzeug (blau), dem statischen Simulator (gelb) und dem dynamischen Simulator, wobei hier der Rollwinkel des virtuellen Motorrads (rot) und der über die Bewegungsplattform dargestellte Lehnwinkel (lila gestrichelt) aufgetragen sind.

Es ist erkennbar, dass das virtuelle Motorrad im dynamischen Fahrsimulator (rot) im hier gezeigten Frequenzbereich bis 5 Hz ähnlich hohe Schwingstärken aufzeigt, wie das reale Motorrad, während das Fahrzeugmodell des statischen Fahrsimulators über den gesamten Frequenzbereich etwa um 20 dB niedrigere Schwingstärken zeigt. Das Fahrdynamikmodell des dynamischen Fahrsimulators zeigt bei manchen Fahrern lokale Maxima in der Schwingstärke bei etwa 0,25 Hz oder 1 Hz (schwarze Kreise). Die Rollraten schwingen in diesem Frequenzbereich demnach stärker, als es beim Realfahrzeug der Fall ist. Dies spiegelt das oben beschriebene überlagerte Schwingungsverhalten wider.

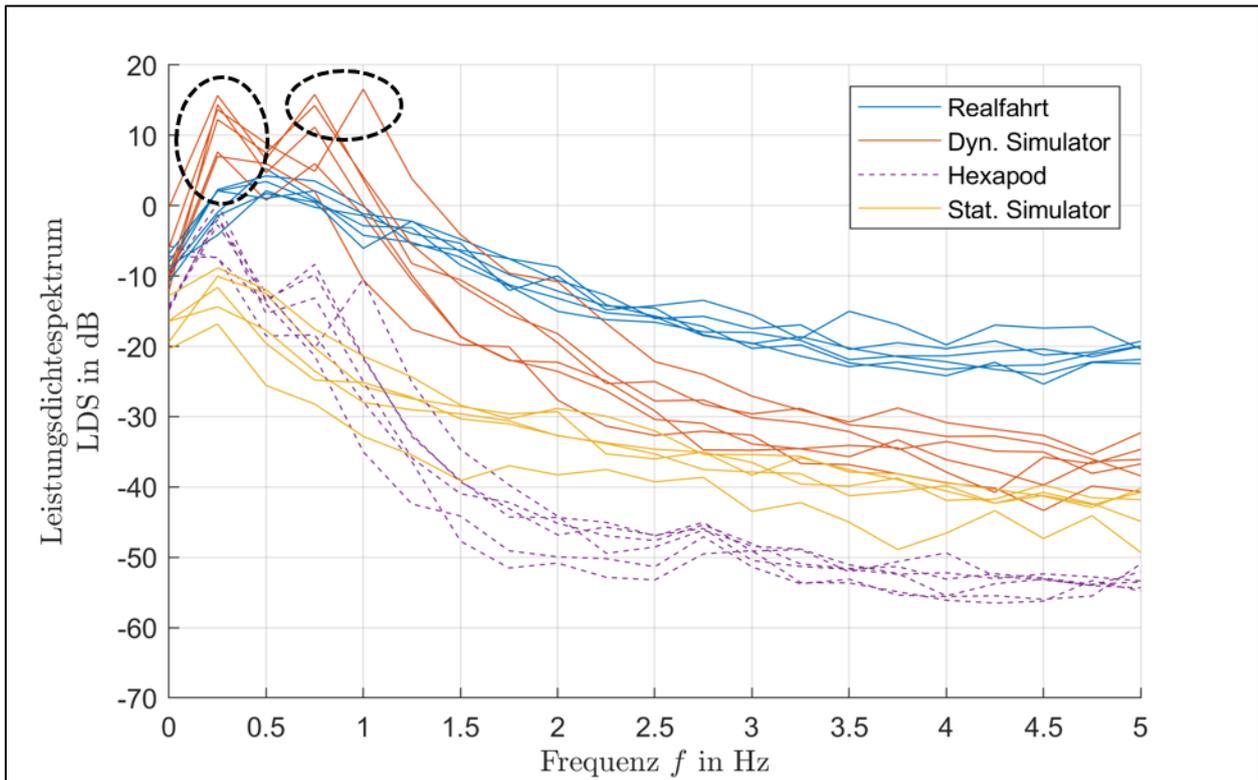


Bild 4-20: Geschätztes Leistungsdichtespektrum der Rollwinkelschwingungen bei Geradeausfahrt, getrennt nach Versuchsumgebung. Im Falle der dynamischen Simulation wird zusätzlich zum Gesamtleistungsdichtespektrum das Leistungsdichtespektrum für den Hexapoden dargestellt.

Die durchgezogenen Linien im Leistungsdichtespektrum beziehen sich hierbei auf die (virtuellen) Fahrzeugrollraten. Die vom Fahrer erlebte Rollbewegung wird im statischen Simulator alleine durch die visuelle Darstellung erreicht. Am dynamischen Simulator hingegen erfolgt eine Darstellung der Rollwinkelschwingungen zusätzlich über die Bewegungsplattform. Das Leistungsdichtespektrum zeigt, dass insbesondere die sehr niederfrequenten Schwingungen durch den Hexapoden gut abgebildet werden. Hierdurch werden den Fahrern zusätzlich haptisch / propriozeptive Reize vermittelt, die einen natürlichen Fahreindruck unterstützen können. Die entsprechenden Schwingstärken sind dem Leistungsdichtespektrum in den gestrichelten Linien zu entnehmen. Sie zeigen dieselbe Überhöhung bei  $f < 1.5$  Hz, wenn auch bei insgesamt niedrigeren Amplituden.

Die geringe Streuung der Verläufe zwischen den verschiedenen Testfahrern deutet darauf hin, dass das Schwingungsverhalten systemimmanent ist und nicht fahrerspezifisch. Gleichwohl kann in einzelnen Verläufen beobachtet werden, dass keine Überhöhung der Schwingstärke auftritt, was möglicherweise auf gut angepasste Fahrer hindeutet. Das Auftreten von Schwingungen größerer Amplitude kann von diesen Fahrern offenbar durch gut angepasste Kontrolleingaben verhindert werden. Dabei ist anstelle einer gänzlichen Minimierung der Schwingung als Zielwert das Schwingungsniveau des Realfahrzeugs anzustreben. Dadurch kann weiterhin der Reiz vermittelt werden, ein eigeninstabiles Einspurfahrzeug zu führen, statt eines nicht destabilisierbaren Zweispurfahrzeugs.

### Zusammenfassung der Stabilitätseffekte

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Stabilitätseffekte Folgendes festgehalten:

<b>S1</b>	In der Realfahrt zeigen sich in der Geradeausfahrt über alle Geschwindigkeitsabstufungen moderate Streuungen des Rollwinkels.
<b>S2</b>	Am dynamischen Simulator treten in der Geradeausfahrt größere Schwankungen des Rollwinkels auf als es in der Realfahrt der Fall ist. Mit zunehmender Geschwindigkeit nähern sich diese dem Niveau der Realfahrt an.
<b>S3</b>	Die statische Simulation zeigt in der Geradeausfahrt ein äußerst schwingungsarmes Verhalten über alle Geschwindigkeiten. Insgesamt ist das System „zu stabil“ und entspricht dahingehend nicht dem fahrphysikalischen Verhalten eines Einspurfahrzeugs. Weiterhin werden die ohnehin schwachen Rückmeldungen rein visuell dargestellt, was den Eindruck der zu großen Stabilität verstärken kann.
<b>S4</b>	In der Realfahrt zeigen sich in den Kurvenfahrten sehr homogene Verläufe des Rollwinkels, die keine makroskopischen Unterschiede zwischen den Fahrern zeigen.
<b>S5</b>	In der dynamischen Motorradsimulation zeigen sich für die Kurvenfahrten deutliche Schwingungen im Rollwinkel, die sich über Schwächen in der bildlichen Darstellung und daraus notwendig werdenden Korrekturen der Trajektorie sowie die sensible Bewegungserfassung des Simulators erklären lassen. Das absolute Niveau des Rollwinkels liegt in etwa auf dem Niveau des Realfahrzeugs.
<b>S6</b>	Die statische Simulation zeigt in den Kurvenfahrten ein nahezu schwingungsfreies Verhalten. Zusätzlich lag das absolute Niveau des Rollwinkels deutlich unter dem der Realfahrt. Die Verläufe des Rollwinkelauf- und -abbaus weichen zusätzlich von der Realfahrt ab. All diese Effekte resultieren aus dem zugrunde liegenden Fahrdynamikmodell.

### 4.2.3 Fahrebene

Neben den bislang beschriebenen Effekten in der Fahrzeuglängsführung und der Fahrzeugstabilität wurden auch auf Ebene des Verhaltens und Erlebens der Probanden Effekte identifiziert. Hierfür werden Betrachtungen auf Ebene der Regelung und hinsichtlich der Fahrerbeanspruchung untersucht.

In Bild 4-21 wird ein exemplarischer Verlauf der Fahreingabegrößen über die Differenz zur Zielgeschwindigkeit für die Bedingung 50 km/h dargestellt. Hierbei ist zu erwarten, dass die Drosselklappe bei Unterschreiten der Zielgeschwindigkeit (negative Differenz) geöffnet wird (Betätigung des Gasdrehgriffs) und bei Überschreiten (positive Differenz) wieder geschlossen wird. Betrachtet man die Drosselklappenstellung (durchgezogene Linien), kann trotz des unterschiedlichen absoluten Niveaus zwischen den Versuchsumgebungen eine permanente fahrerseitige Regelung festgestellt werden. Parallele Linien zur x-Achse stellen dabei Bereiche dar, in denen die Drosselklappenstellung bei sich ändernder Geschwindigkeit konstant gehalten wird. Bei Betrachtung der Verläufe für die verschiedenen Versuchsumgebungen wird deutlich, dass der Fahrer in der Realfahrt und auf dem dynamischen Simulator deutlich geringere Regelbewegungen am Gasdrehgriff benötigt, um die gewünschte Geschwindigkeit zu halten. Am statischen Simulator wird ein deutlich größerer Teil des zur Verfügung stehenden Bereichs genutzt, was ebenfalls auf die bereits erwähnte geringere Rückmeldung über die Geschwindigkeitsanpassung zurückzuführen sein kann.

Eine zusätzliche Information, die der Darstellung entnommen werden kann, ist die Streuung der Geschwindigkeit um den Zielwert (Breite der Linien entlang der x-Achse). Hierbei zeigen sich in der statischen Simulation deutlich größere Regelabweichungen der Geschwindigkeit, was für eine Einschränkung auf Ebene der Verhaltensvalidität spricht.

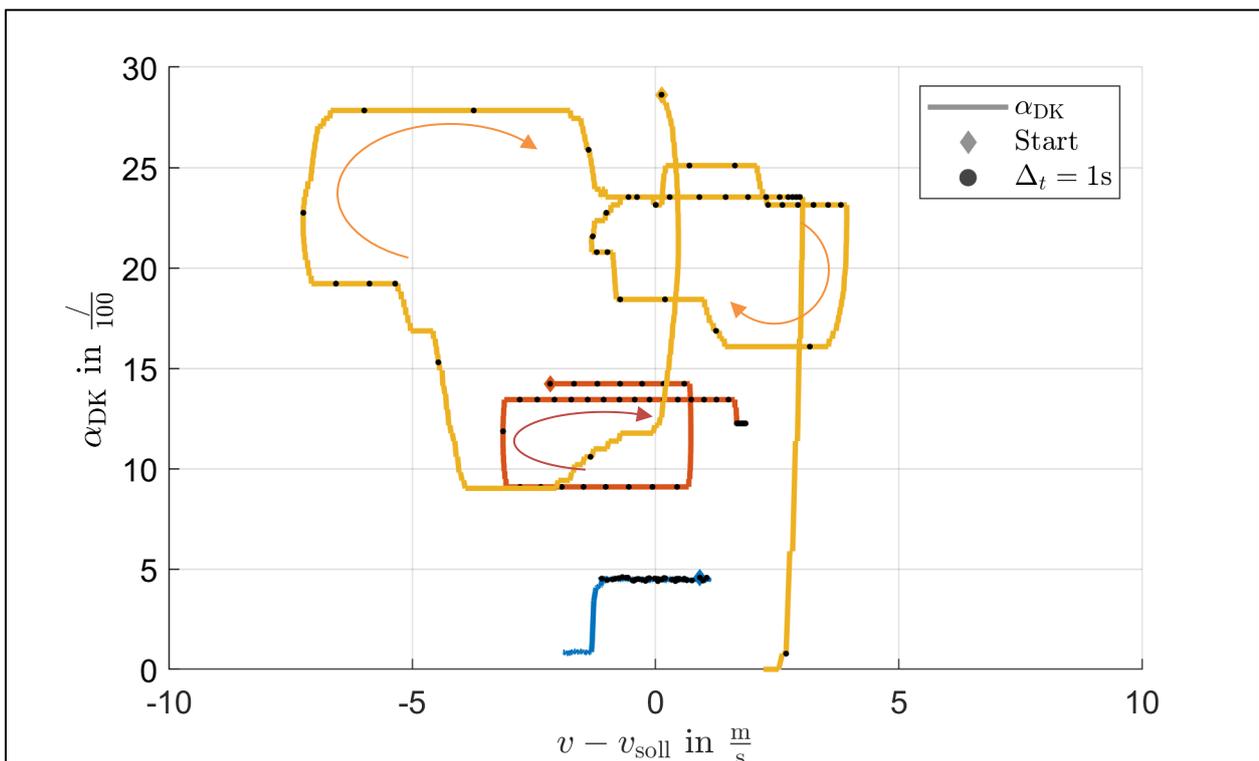


Bild 4-21: Exemplarischer Verlaufsplot des Minimal Szenarios konstante Geradeausfahrt. Dargestellt werden die Drosselklappenstellungen über die Differenz zur Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Versuchsumgebungen. Mit der Raute wird der Startpunkt des dargestellten Regelungsverlaufs dargestellt; die Punktierungen deuten Zeitabstände von 1s an. Die Durchgezogenen Linien stellen die Regelung an der Drosselklappenstellung dar (via Gasdrehgriff). Bremsengriffe treten im dargestellten Beispiel nicht auf.

Betrachtet man das fahrerseitige Regelverhalten für eine Bremsung in den Stand, zeigt sich zunächst in allen drei Umgebungen ein Schließen des Gasdrehgriffs (Bild 4-22, gepunktete Linie, positive Skala)). Erst nach einer initialen Geschwindigkeitsreduktion beginnt in Realfahrt und dynamischer Simulatorfahrt der Bremsvorgang (negative Skala). Hierbei ist zu beobachten, dass der Fahrer in der Realfahrt lediglich den

Handbremshebel betätigt (durchgezogene Linie), während er auf dem dynamischen Simulator auch die Fußbremse (durchbrochene Linie) einsetzt.

Beim statischen Simulator ist auch hier der zuvor beschriebene Effekt erkennbar, dass der Fahrer die Geschwindigkeit zunächst nach oben korrigiert. Anschließend erfolgt eine umso stärkere Bremsung. Es wird abermals deutlich, dass die Geschwindigkeitsregelung für den Fahrer auf dem statischen Simulator deutlich schwieriger zu sein scheint, was bereits von WILL (2017) beobachtet werden konnte.

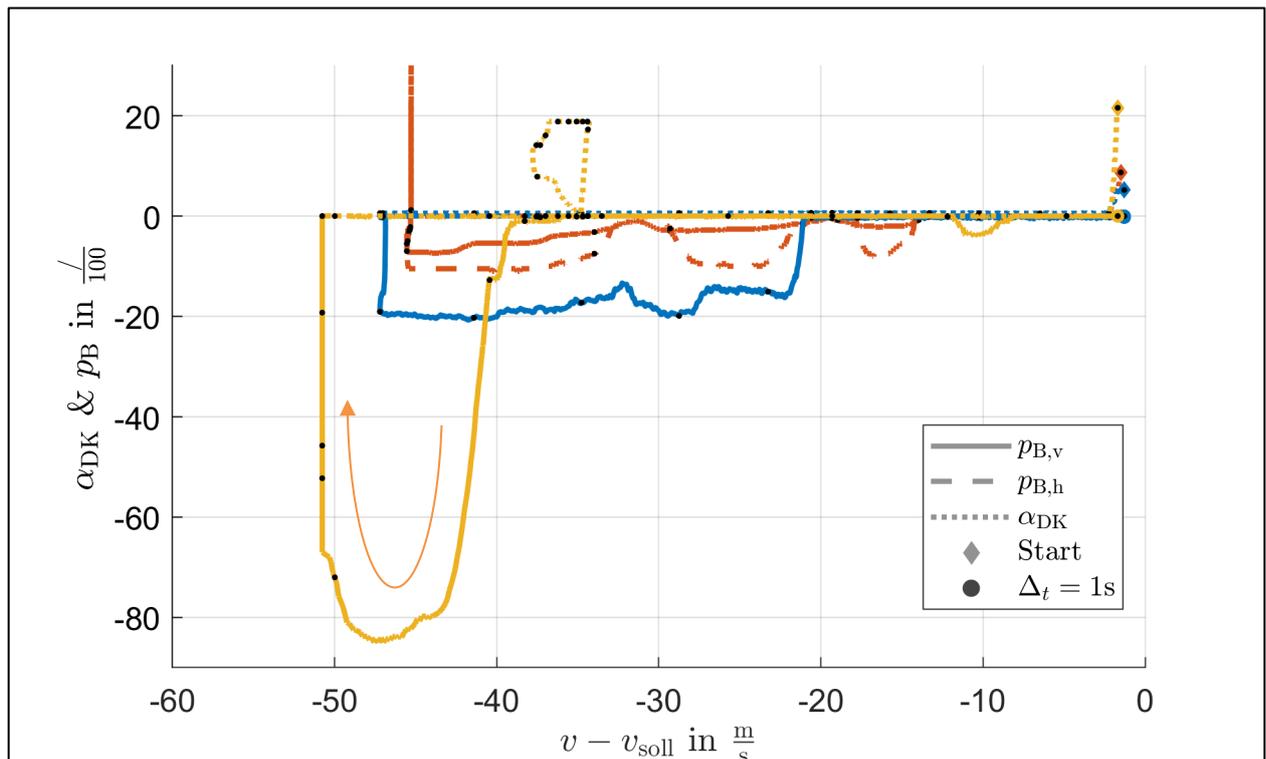


Bild 4-22: Exemplarischer Verlaufplot des Minimal szenarios Zielbremsung in den Stand. Dargestellt werden die Fahrerereignisse für Drosselklappenstellung, Vorderradbremse und Hinterradbremse über die Differenz zur Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Versuchsumgebung. Mit der Raute wird der Startpunkt des dargelegten Regelungsverlaufs dargestellt; die Punktierungen deuten Zeitabstände von 1s an. Die gepunkteten Linien stellen die Regelung an der Drosselklappenstellung dar (via Gasdrehgriff). Die durchgezogenen und durchbrochenen Linien stellen Bremsungen am Vorder- respektive Hinterrad dar.

In Bild 4-23 wird ein exemplarischer Verlauf einer Kurvenfahrt mit konstanter Geschwindigkeit dargestellt. Im oberen linken Teil der Abbildung (Subplot a) wird die Trajektorie inklusive der Pylonenpositionen für Kurvenbeginn (Symbol  $\circ$ ), Kurvenscheitelpunkt (Symbol  $\diamond$ ) und Kurvenende (Symbol  $\times$ ) dargestellt. Oben rechts (Subplot c) werden die Geschwindigkeiten für alle Versuchsumgebungen sowie die Soll-Geschwindigkeit dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Geschwindigkeit für alle Versuchsumgebungen während der Kurvenfahrt leicht absinkt, aber im Allgemeinen in ausreichendem Maß gehalten werden kann.

In der darunterliegenden Plot-Ebene (Subplot d) werden der Rollwinkel (durchgezogene Linie;  $\varphi$ ) und die Rollrate (durchbrochene Linie;  $\dot{\varphi}$ ) dargestellt. Für den dynamischen Simulator wird neben dem Rollwinkel aus der Fahrdynamiksimulation zusätzlich der dem Fahrer dargebotene Rollwinkel dargestellt. Dieser ergibt sich aus Addition des durch die Mockup-Bewegung dargestellten Winkels und der Bilddrehung in der Projektion. Im vorgestellten Beispiel zeigt sich, dass eine gute Übereinstimmung zwischen dem Rollwinkel aus der Realfahrt und der Fahrdynamiksimulation erreicht wird. Der durch das Mockup dargestellte Rollwinkel fällt geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine 1:1 skalierte Abbildung des Rollwinkels durch die Hexapod Plattform dank fehlender Zentripetalbeschleunigung nicht möglich – oder gar sinnvoll – ist. Eine vollständige Abbildung des entstehenden Differenzrollwinkels zwischen Plattform und Fahrdynamikmodell durch Bilddrehung würde wiederum zu hohen Bilddrehraten erfordern, welche in Zusammenhang mit ungewünschten Sickness-Effekten stehen. Die Rollwinkel für die statische Simulation fallen deutlich geringer aus, was wie bereits zuvor beschrieben durch das zugrunde liegende vereinfachte Einspursimulationsmodell zu begründen ist.

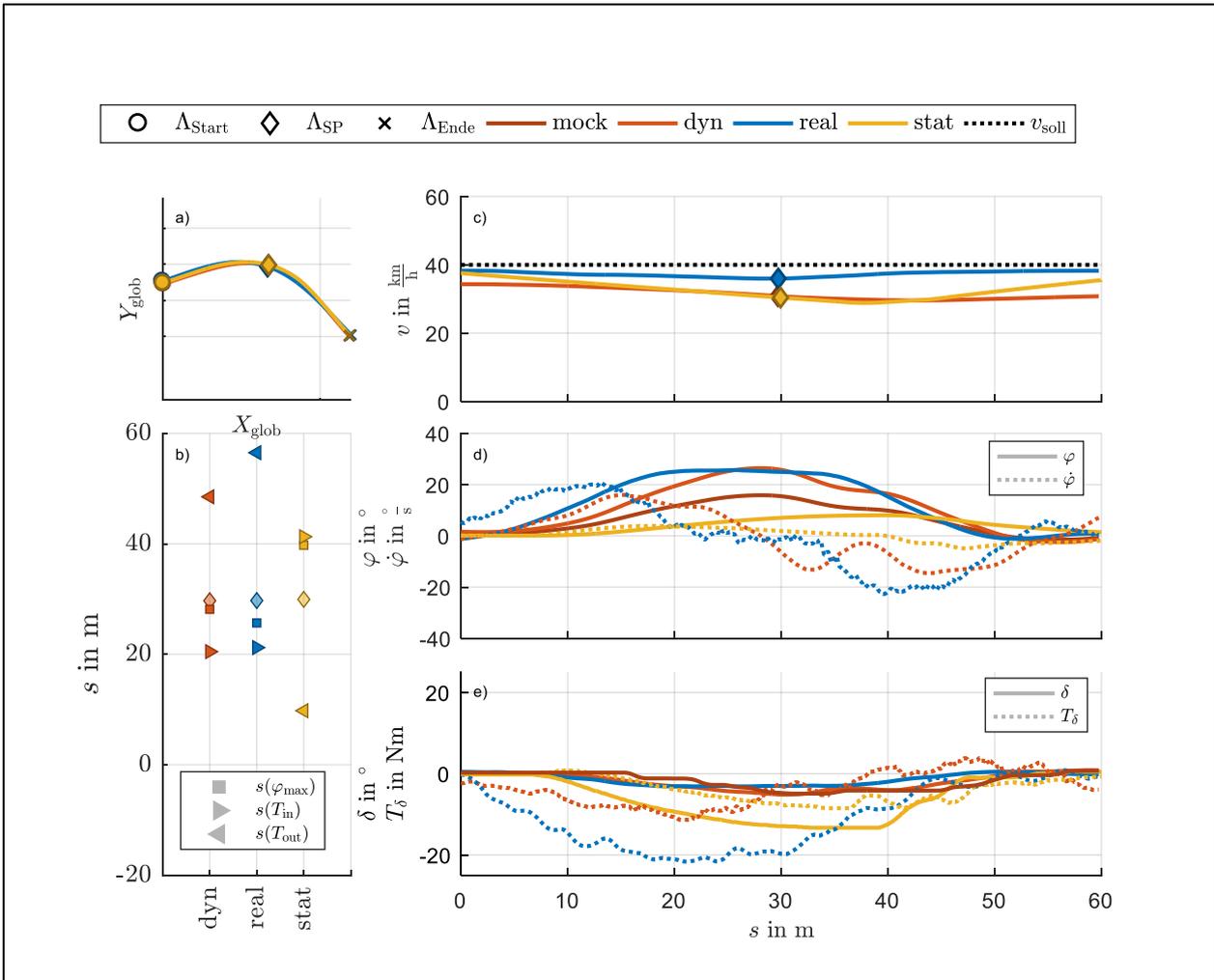


Bild 4-23: Konstante Kurvenfahrt, Kurve 2, gefahren in West-Ost Richtung, Zielgeschwindigkeit: 40 km/h. Dargestellt werden die Trajektorie (Subplot a), die Streckenpositionen markanter Kurvenkennwerte (Subplot b) die gefahrene Geschwindigkeit (Subplot c), die Verläufe des Rollwinkels (Subplot d) und die Lenkwinkel und Lenkmomente (Subplot e).

In der untersten Plot-Ebene (Subplot e) werden Lenkwinkel (durchgezogene Linie;  $\delta$ ) und Lenkmoment (durchbrochene Linie;  $T_\delta$ ) für die drei Versuchsumgebungen dargestellt. Wie schon beim Rollwinkel entsprechen dynamische Simulation und Realfahrt einander in der Tendenz der Verläufe. Davon abweichend zeigen sich in der statischen Motorradsimulation deutlich größere Lenkwinkel bei gleichzeitig geringeren Lenkmomenten. Auch hier liegt die Begründung im zugrunde liegenden Modell. Effekte, die dem Kurvein- oder -ausleiten zuzuordnen sind, werden weiter unten getrennt nach Minimalszenarien beschrieben.

Der letzte Plot unten links (Subplot b) zeigt relativ zum Kurvenscheitelpunkt (Symbol  $\diamond$ ) die Lage des Rollwinkelmaximums sowie die Lage des maximalen Lenkmoments für Kurvein- und -ausleitung. Hierbei fällt insbesondere auf, dass für nahezu alle betrachteten Fahrten in Sequenz 3 das Rollwinkelmaximum für Realfahrt und dynamischen Simulator sehr nah am Scheitelpunkt der Kurve liegen, meist kurz davor, während das Rollwinkelmaximum beim statischen Simulator deutlich später auftritt.

Im Folgenden werden die Effekte der Fahrerbeanspruchung dargestellt. Im Rahmen der Befragung wurde nach jeder Sequenz eine Befragung für jedes einzelne Minimalszenario durchgeführt. Die Befragung erfolgte getrennt für die Beanspruchung, die aus der Fahraufgabe resultierte und die Beanspruchung, die durch die Reaktion auf den PDT erzeugt wurde. Bei der Analyse der Daten zeigte sich eine sehr starke Übereinstimmung zwischen diesen beiden Beurteilungen, was sich in einer Produkt-Moment-Korrelation  $r > .8$  ( $p < .01$ ) über alle Sequenzen hinweg zeigt, weswegen lediglich die Ergebnisse hinsichtlich der Beanspruchung durch die Fahraufgabe vorgestellt werden. Betrachtet man die Bewertung getrennt nach Mi-

nimalszenario, ohne weitere Betrachtung der Variation, so zeigt sich für alle Umgebungen ein einheitliches Muster. In der dynamischen Simulation wird die Beanspruchung konstant höher bewertet als in den beiden anderen Bedingungen (Bild 4-24). Bemerkenswert ist die äußerst hohe Übereinstimmung in der erlebten Beanspruchung zwischen statischer Simulation und Realfahrt. Leichte Abweichungen finden sich am ehesten in der konstanten Geradeausfahrt und bei Anpassungsbremungen. Generell ist anzumerken, dass es sich bei der Betrachtung der Beanspruchung um eine vereinfachte Größe handelt. So könnte man davon ausgehen, dass sich die erlebte Gesamtbeanspruchung aus unterschiedlichen Teilressourcen ergibt (vgl. beispielsweise des Ressourcenmodell von WICKENS, 1984). Hierdurch ist es möglich, dass eine insgesamt zwar gleichermaßen hohe Beanspruchung resultiert, die sich jedoch aus unterschiedlichen Teilkomponenten zusammensetzt.

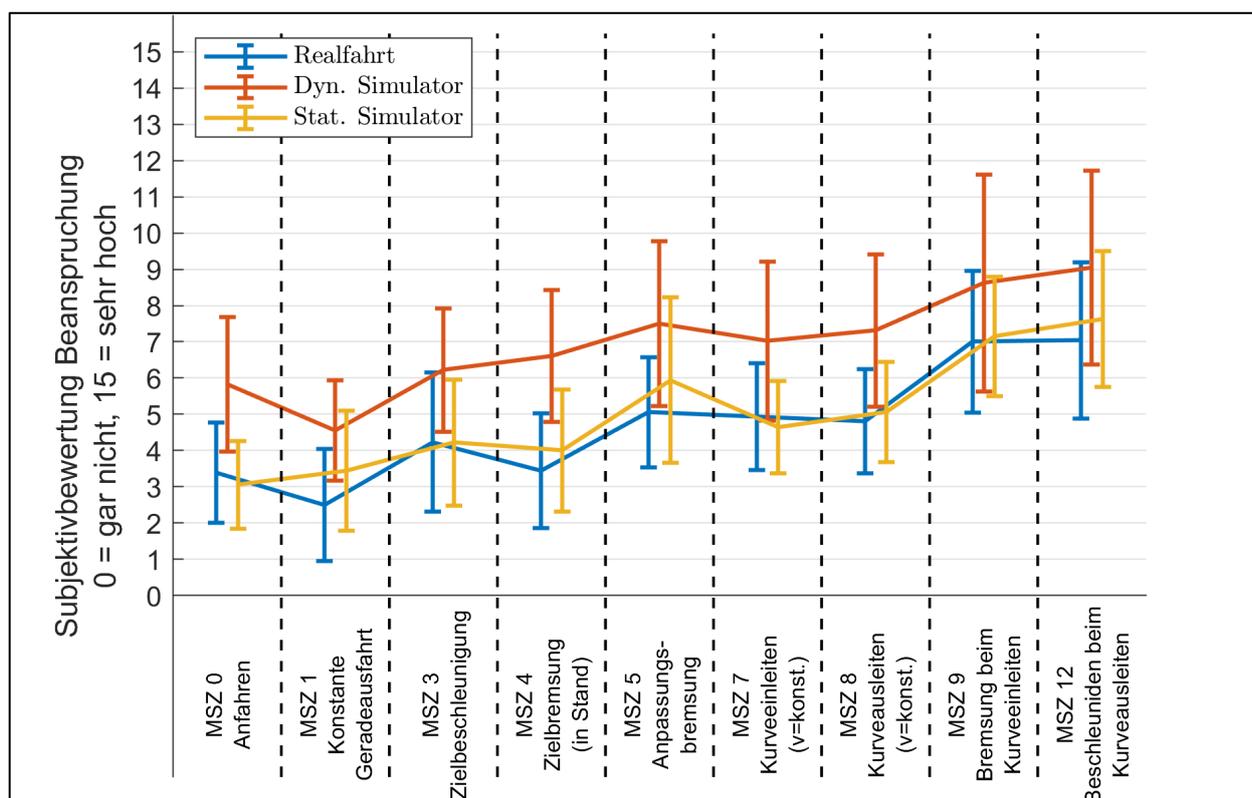


Bild 4-24: Mittlere Bewertung zur erlebten Beanspruchung durch die Fahraufgabe getrennt nach Minimalszenarien und Versuchsumgebung

Auf Ebene des Peripheral Detection Tasks zeigt sich ein deutlich komplexeres Bild (Bild 4-25). In Sequenz 1 liegen bis auf die höchste Geschwindigkeit alle Umgebungen auf einem ähnlichen Niveau. Lediglich in der Bedingung „110 km/h“ steigen in der dynamischen Simulation der Anteil verpasster Signale und die Reaktionszeit, wodurch eine deutliche Abweichung zu den beiden anderen Versuchsumgebungen entsteht. In Sequenz 2 zeigt sich eine weitere Dimension, da die statische Simulation teilweise auf einem geringeren Reaktionszeitniveau agiert, als die Realfahrt. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für den Anteil verpasster Signale. Abermals weicht die dynamische Simulation deutlich ab, was sich in höheren Reaktionszeiten und einem größeren Anteil verpasster Signale niederschlägt. Dieser Effekt nimmt mit der Dynamik, also der verfügbaren Strecke zum Beschleunigen und Bremsen zu. In den Kurvenfahrten mit konstanter Geschwindigkeit zeigt sich abermals eine gute Übereinstimmung zwischen Realfahrt und statischer Simulation, wobei die Reaktionszeiten in der statischen Simulation etwas höher sind, dafür aber geringere Missingraten aufweisen. Die dynamische Simulation weicht insgesamt stärker von der Realfahrt ab. Außerdem scheint die Zielgeschwindigkeit einen leichten Einfluss auf die Reaktionszeit und die Fehlerrate zu nehmen, was jedoch aufgrund der hohen Standardabweichung nicht interpretiert werden kann. Auch in der dynamischen Kurvenfahrt stimmen die statische Simulation und die Realfahrt gut überein. Lediglich die Fehlerrate unterscheidet sich in einer der untersuchten Permutationen deutlich. Die dynamische Simulation zeigt in dieser Fahraufgabe die geringsten Abweichungen zu den beiden anderen Versuchsumgebungen.

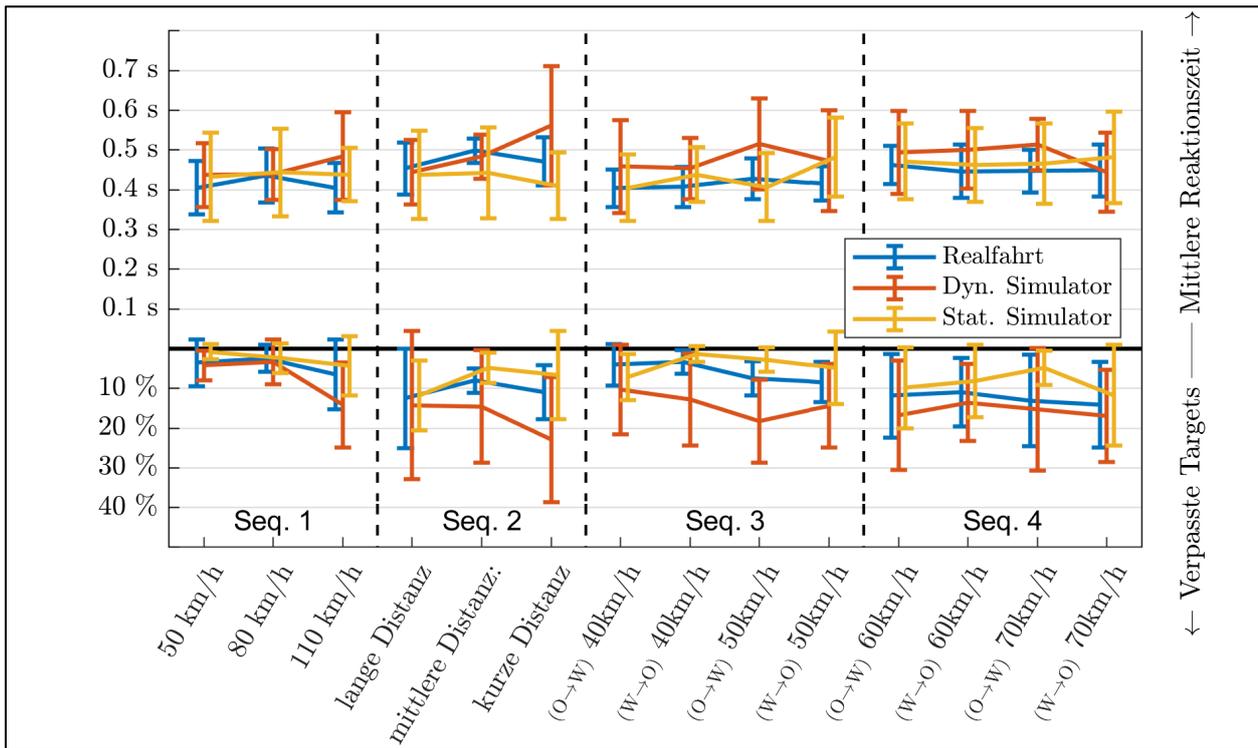


Bild 4-25: Mittlere Reaktionszeit auf den PDT und mittlere Fehlerrate getrennt nach Sequenz und Versuchsumgebung.

**Zusammenfassung der Effekte auf Regelungs- und Beanspruchungsebene**

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Effekte auf Ebene der Regelung und Beanspruchung Folgendes festgehalten:

<b>RB1</b>	In der Realfahrt und der dynamischen Motorradsimulation zeigten sich für die Geschwindigkeitsregelung in der konstanten Geradeausfahrt nur moderate Eingriffe.
<b>RB2</b>	In beiden Simulationsumgebungen zeigten sich längsregulatorisch mehr und größere Regelungseingriffe als in der Realfahrt, wobei dies in der statischen Simulation stärker ausgeprägt ist. In der dynamischen Simulation gelingt es den Fahrern trotz der vermehrten Regelung, das Geschwindigkeitsziel konstanter einzuhalten, als es in der statischen Simulation der Fall ist. Mögliche Ursachen können in den unterschiedlichen Gasdrehgriffkennlinien liegen oder in einer abweichenden Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kann dies jedoch nicht weiter aufgetrennt werden.
<b>RB3</b>	In der statischen Simulation zeigten sich deutlich größere Lenkwinkel, die zum Manövrieren des simulierten Fahrzeugs benötigt wurden, was den Erwartungen an das verwendete Modell entspricht.
<b>RB4</b>	Die erlebte Beanspruchung stimmte über alle untersuchten Minimalszenarien hinweg in der statischen Simulation und der Realfahrt sehr gut überein. Die Bewertungen zur erlebten Beanspruchung in der dynamischen Simulation liegen in allen Minimalszenarien über den beiden anderen Versuchsumgebungen, zeigen aber das gleiche Muster, was ein Indiz für das Vorliegen relativer Validität darstellt.

RB5

Die Ergebnisse des PDT zeigen insgesamt eine bessere Übereinstimmung zwischen statischer Simulation und Realfahrt. Teilweise liegt das Niveau der statischen Simulation unterhalb des Niveaus der Realfahrt, sodass in diesem Falle von einer Unterschätzung der Beanspruchung ausgegangen werden muss. In der dynamischen Simulation scheint insgesamt die Tendenz zu bestehen, dass die Bearbeitungsleistung für den PDT schlechter wird, wenn die Dynamik der Situation steigt.

#### 4.2.4 Nachbefragung

Wie in Kapitel 0 erläutert, wurden die beiden Versuchsteile, die in der Simulation durchgeführt wurden, mit einer Nachbefragung abgeschlossen. Im Folgenden werden deren Ergebnisse dargestellt. Der vollständige Fragebogen findet sich im Anhang unter Kapitel 11.1.

Den Fahrern wurden acht Fragen zur Interaktion mit dem Simulator und der Simulationsumwelt gestellt. Hierbei lag der Fokus neben dem Gesamteindruck zur Simulation insbesondere auf dem Lenkverhalten der Simulatoren. Auf die Frage nach dem Gesamteindruck des Simulators geben die Untersuchungsteilnehmer deutlich höhere Urteile für den dynamischen Simulator ab, als es für den statischen Simulator der Fall ist (Bild 4-26 links). Während der Großteil der Probanden die Realitätstreue des dynamischen Simulators als „mittel“ bis „gut“ bewerten, wird der statische Simulator diesbezüglich im Bereich „sehr wenig“ bis „wenig“ beurteilt. Entsprechend der Realitätstreue der Simulatoren wird auch bei der Frage: „Wie realistisch war das Lenkverhalten des Simulators, im Vergleich zu einer realen Motorradfahrt?“ der dynamische Motorradsimulator positiver bewertet als der statische Simulator (Bild 4-26, 2. von links). Während der Großteil der Probanden den dynamischen Motorradsimulator im Bereich „gut“ bewertet, wird der statische Motorradsimulator mit „sehr wenig“ bewertet. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Beurteilung der Kräfte, die zum Lenken aufgebracht werden müssen (Bild 4-26, 3. von links). Die Bewertungen für den dynamischen Simulator erstrecken sich von „mittel“ bis „sehr gut“, wohingegen diese für den statischen Simulator im Bereich „sehr wenig“ bis „wenig“ liegen. In direktem Zusammenhang zu den Fragen zur Lenkung steht die Frage „Wie gut konnten Sie der Fahrspur folgen?“ (Bild 4-26 rechts). Hierbei zeigt sich ein von den Fragen zur Lenkung abweichendes Bild, da die Untersuchungsteilnehmer für beide Umgebungen Bewertungen im Bereich „mittel“ bis „gut“ bewerten. Daraus lässt sich ableiten, dass es den Fahrern trotz deutlich abweichender Realitätsnähe der Lenkung gelingt, das Verhalten des Simulators gleichermaßen zu nutzen und daran zu adaptieren.

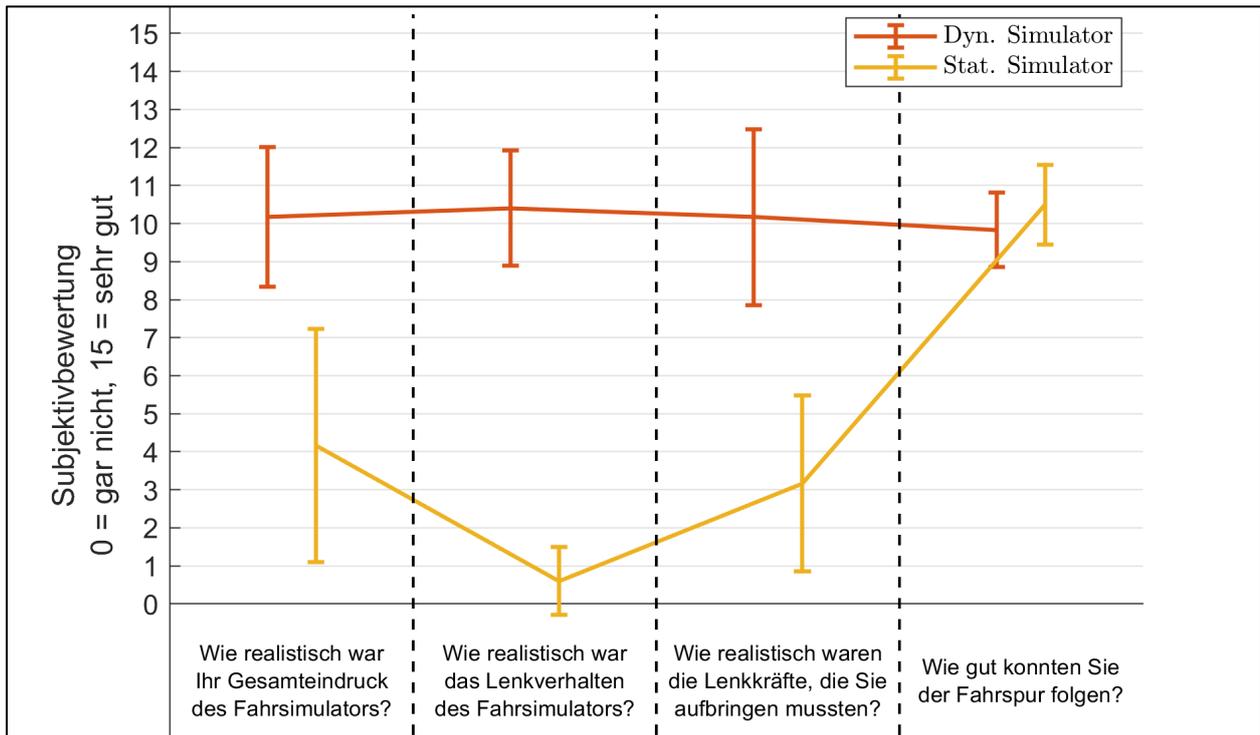


Bild 4-26: Mittlere Bewertung der Items „Wie realistisch war Ihr Gesamteindruck des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch war das Lenkverhalten des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch waren die Kräfte, die Sie zum Lenken aufbringen mussten?“ und „Wie gut konnten Sie der Fahrspur folgen?“, aufgeteilt nach den Simulorausbaustufen statisch und dynamisch.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den Fragen zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung erläutert.

Die Untersuchungsteilnehmer beurteilen die Natürlichkeit in der Interaktion mit dem dynamischen Motorrad Simulator besser und konsistenter als mit der statischen Simulation (Bild 4-27 links). Auch wird bewertet, dass der dynamische Motorrad Simulator besser mit den Erfahrungen aus der Realität übereinstimmt als der statische Simulator (Bild 4-27, 2. von links).

Die Probanden geben auf die Frage danach, wie gut die virtuelle Umgebung überblickt werden konnte, für die statische Simulation sehr positive Urteile (invertierte Skala) an (Bild 4-27, 3. von links). Im Gegensatz dazu wird die dynamische Simulation weniger gut bewertet. Zusätzlich zeigt sich eine sehr große Streuung der Beurteilungen. Gründe hierfür liegen möglicherweise in der größeren Bildfläche, die durch den dynamischen Motorrad Simulator zur Verfügung gestellt wird, die jedoch im Vergleich zum statischen Motorrad Simulator über einen schlechteren Helligkeits- und Farbkontrast sowie über eine geringere Auflösung verfügt.

Für beide Umgebungen wird angegeben, dass das Bewegen des Motorrads in der virtuellen Realität leicht gefallen sei (Bild 4-27 rechts). Hierbei wird der dynamische Motorrad Simulator tendenziell besser bewertet als der statische Motorrad Simulator.

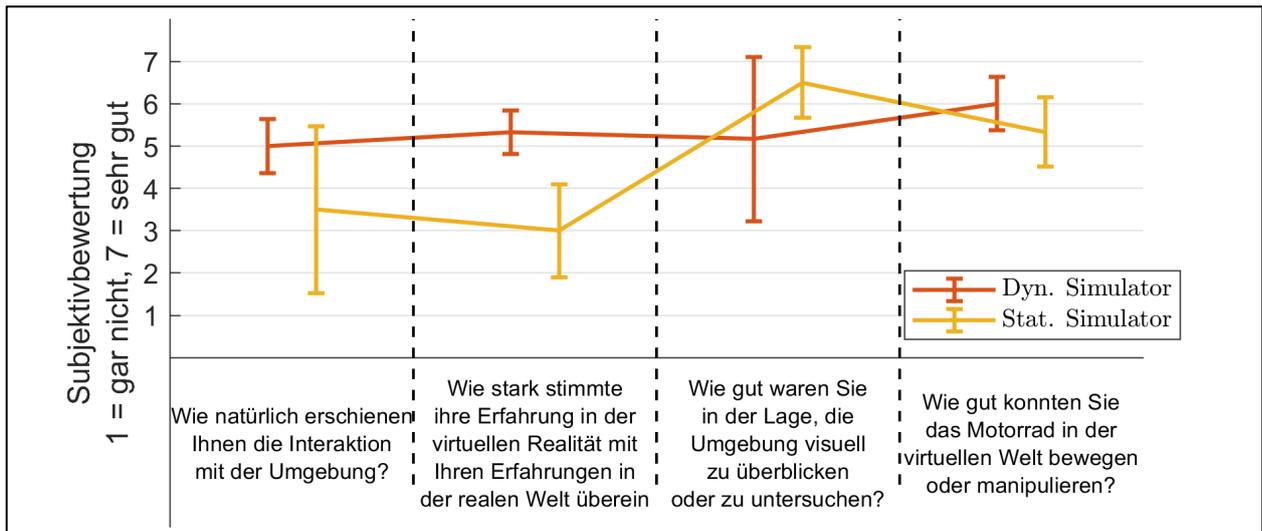


Bild 4-27: Mittlere Bewertung für die Fragen: „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?“, „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“, „Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?“ und „Wie gut konnten Sie das Motorrad in der virtuellen Realität bewegen oder manipulieren?“, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.

Im Rahmen der Präsenzbeurteilung wurden die Probanden mittels acht Items befragt (Bild 4-28). Hierbei zeigen sich für den Großteil Befragungsebenen bessere Bewertungen für den dynamischen Motorradsimulator. Dennoch zeigen sich für viele Items heterogene Bewertungen, die sich in einem großen Streubereich ausdrücken.

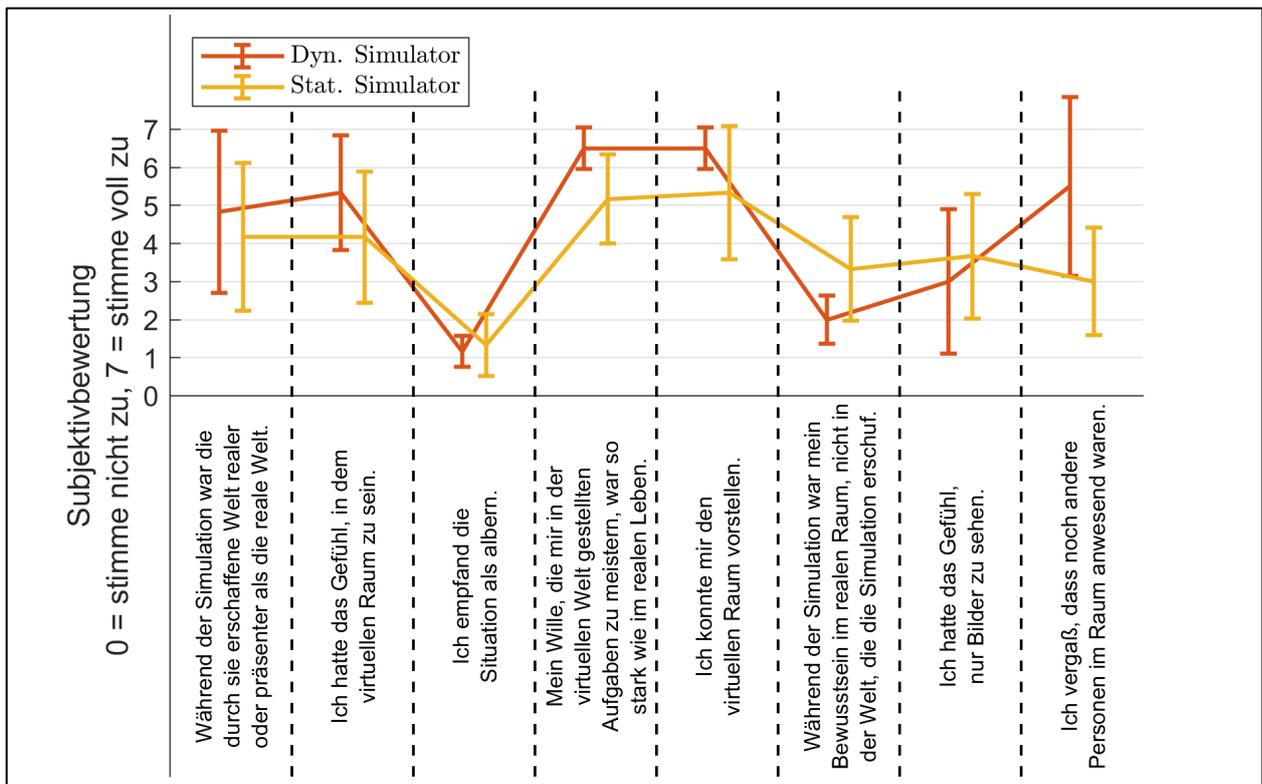


Bild 4-28: Mittlere Bewertung der acht Items der Präsenzbefragung, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.

Um einen besseren Eindruck über die erlebte Stabilisierung der Simulatoren zu erhalten, wurden die Untersuchungsteilnehmer zusätzlich bezüglich der Eigenstabilisierung der Simulatoren befragt. Zur besseren Differenzierung wird die Stabilisierung getrennt für die Geschwindigkeitsbereiche 0-30 km/h, 30-60 km/h, 60-90 km/h und >90 km/h erfragt. Im Geschwindigkeitsbereich 0-30 km/h bewerten die Fahrer die Eigenstabilisierung des statischen Motorradsimulators als deutlich zu hoch (Bild 4-29 links). Im Gegensatz dazu wird die Eigenstabilisierung des dynamischen Motorradsimulators von einem Großteil der Fahrer als tendenziell zu niedrig beurteilt, jedoch streuen die Ergebnisse hierbei sehr stark. Im Geschwindigkeitsbereich 30-60 km/h bewerten die Probanden die Eigenstabilisierung in beiden Simulatoren als tendenziell zu niedrig (Bild 4-29, 2. von links). Dabei streuen die Beurteilungen in beiden Umgebungen stark, was im Falle des statischen Simulators noch deutlicher ausgeprägt ist. Auch im Geschwindigkeitsbereich von 60-90 km/h bewerten die Teilnehmer die Eigenstabilisierung des statischen Motorradsimulators als tendenziell zu niedrig, wobei die Streuung abermals sehr hoch ist (Bild 4-29, 3. von links). Der dynamische Motorradsimulator wird in diesem Geschwindigkeitsbereich von einem Großteil der Fahrer als „tendenziell instabiler“ bis „der Realität entsprechend“ bewertet. Im Geschwindigkeitsbereich > 90 km/h geben die Fahrer Urteile im Bereich von „der Realität entsprechend“ bis „etwas zu hoch“ ab (Bild 4-29, 4. von links). Für den statischen Motorradsimulator liegen die Beurteilungen im Bereich von „geringer als in der Realität“ bis „der Realität entsprechend“.

Neben der Eigenstabilisierung der Simulatoren wurden die Probanden bezüglich der erlebten Stabilisierung in Kurvenfahrten befragt (Bild 4-29 rechts). Wie bereits bei der Eigenstabilisierung des Fahrzeugs werden für den statischen Motorradsimulator äußerst heterogene Bewertungen abgegeben, die sich hierdurch kaum interpretieren lassen. Beim dynamischen Motorradsimulator gibt der Großteil der Teilnehmer Bewertungen im Bereich noch zu niedrig bis tendenziell zu niedrig ab. Wie bereits bei der Betrachtung der erlebten Beanspruchung in den Sequenzen 3 und 4 könnte auch dieses Ergebnis in Zusammenhang mit den Geschwindigkeiten stehen, die im Rahmen der Studie umgesetzt werden konnten.

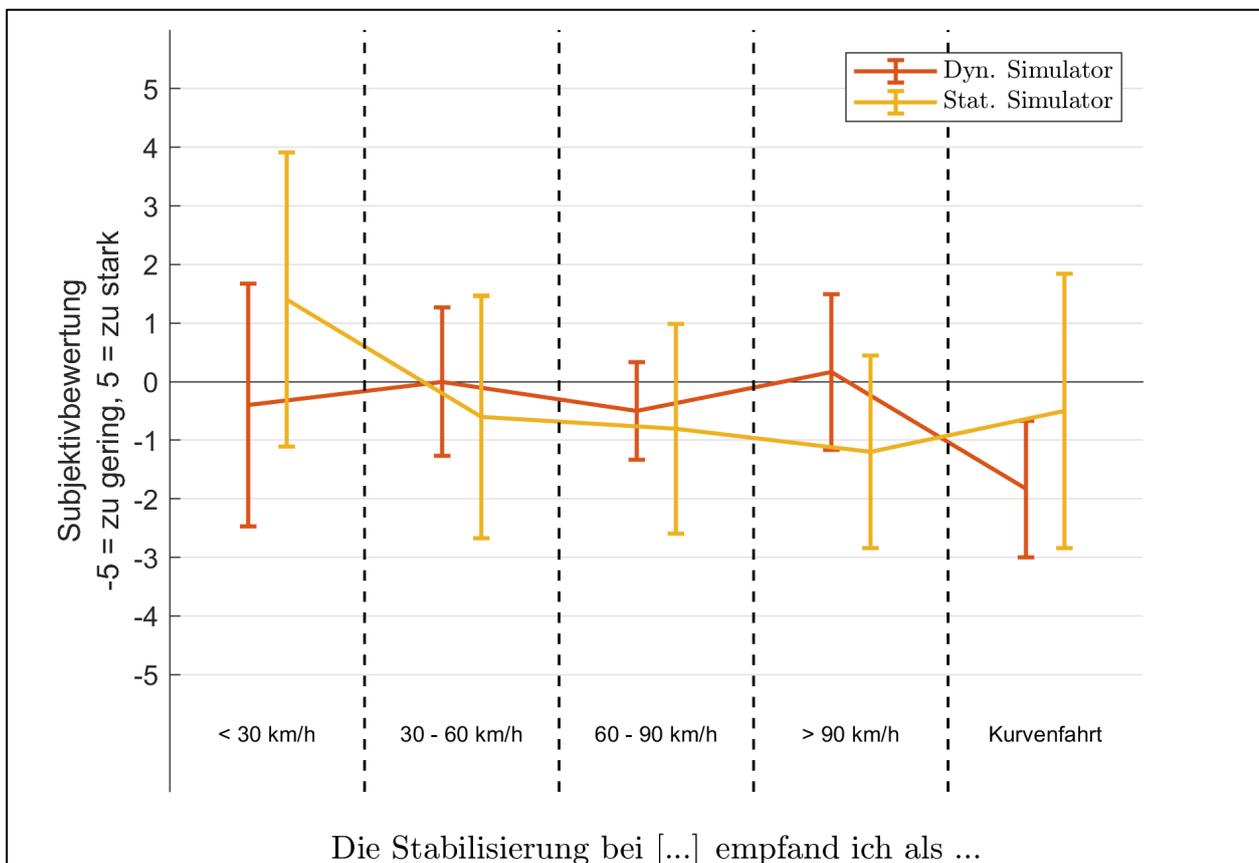


Bild 4-29: Mittlere Bewertung der Items „Stabilisierung des Fahrzeugs von 0-30 km/h“ (oben links), „Stabilisierung des Fahrzeugs von 30-60 km/h“ (oben rechts), „Stabilisierung des Fahrzeugs von 60-90 km/h“ (unten links) und „Stabilisierung des Fahrzeugs bei > 90 km/h“ (unten rechts), aufgeteilt nach den Simulatorausbaustufen statisch und dynamisch.

Die Untersuchungsteilnehmer bewerteten neben dem Gesamteindruck des Simulators dessen dynamische Eigenschaften. Hierbei wurde getrennt nach visueller Rückmeldung und haptisch / propriozeptiver Rückmeldung befragt. Während die visuelle Rückmeldung sowohl für den statischen als auch den dynamischen Simulator abgefragt wurde, fand die Bewertung der haptisch / propriozeptive Rückmeldung nur für den dynamischen Simulator statt. Eine Ausnahme bilden dabei die Fragen zur Lenkung, die lediglich auf haptisch / propriozeptiver Ebene erfragt wurden. In Bild 4-30 wird die subjektive Bewertung der Fahrer als Histogramm dargestellt. In der Darstellung entspricht ein Wert in der Mitte einer Übereinstimmung mit dem Realfahrzeug. Je negativer die Werte (nach links), desto schwächer / kleiner wird die Rückmeldung im Vergleich zum Realfahrzeug erlebt. Je weiter die Werte in positive Richtung verschoben sind, desto stärker / größer wird die Rückmeldung im Vergleich zum Realfahrzeug bewertet.

Mit Blick auf die visuelle Rückmeldung der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, der Beschleunigung und der Verzögerung werden in beiden Simulationsumgebungen schwächere Rückmeldungen als in der Realfahrt angegeben. Die Bewertungen fallen für die statische Simulation schlechter aus, als es für den dynamischen Simulator der Fall ist. In beiden Simulationsumgebungen fällt die Bewertung der visuellen Rückmeldung zur Verzögerung etwas besser aus, als die Bewertungen zur Geschwindigkeit und zur Beschleunigung. Bezüglich der haptisch / propriozeptiven Rückmeldung wird am häufigsten eine „zu schwache“ Rückmeldung des dynamischen Motorradsimulators angegeben. Für Beschleunigung und Bremsung wird die haptisch / propriozeptive Rückmeldung des dynamischen Simulators am häufigsten als „etwas zu schwach“ bewertet, jedoch auch teilweise als „der Realität entsprechend“.

Die Rotationsbewegungen um die Fahrzeugachsen Nicken, Rollen und Gieren werden auf visueller Ebene sehr heterogen bewertet. Im Falle des Nickens erstrecken sich die Bewertungen für den dynamischen und den statischen Simulator über nahezu den gesamten Wertebereich; eine Tendenz lässt sich daraus nicht erkennen. Bezüglich der visuellen Rückmeldung der Rollbewegung liegen die meisten Bewertungen in der statischen Simulation bei „etwas zu niedrig“. Für die dynamische Simulation verteilen sich die Bewertungen um die Nullposition herum. Die Bewertungen der visuellen Rückmeldungen des Gierwinkels fallen abermals sehr heterogen aus. Im Falle des statischen Simulators lässt sich daraus keine Tendenz ableiten. In der dynamischen Simulation besteht am ehesten eine Tendenz zur Mitte, wobei zwei Untersuchungsteilnehmer hierzu keine Bewertung abgaben. Für die haptisch / propriozeptive Rückmeldung des dynamischen Motorradsimulators werden ähnlich heterogene Bewertungen abgegeben, wie es bei der visuellen Rückmeldung dieser Winkelbewegung der Fall war. Die Bewertung der Rollwinkeldarstellung erstreckt sich gleichverteilt von „zu gering“ bis „der Realität entsprechend“. Die Bewertungen der haptisch / propriozeptiven Rückmeldung des Gierwinkels liegt in den meisten Fällen bei „etwas zu gering“, gefolgt von „der Realität entsprechend“.

Die haptisch propriozeptive Rückmeldung der Querbeschleunigung verteilt sich für den dynamischen Motorradsimulator gleichmäßig auf „deutlich zu niedrig“ und „zu niedrig“.

Die auftretenden Lenkwinkel werden in beiden Simulationsbedingungen als zu groß bewertet, wobei die Bewertungen für den dynamischen Simulator etwas besser ausfallen, als für den statischen Simulator. Die Bewertung der Lenkdämpfung erstreckt sich in beiden Simulationsumgebungen über einen großen Wertebereich. Für die dynamische Simulation lässt sich hieraus keine Tendenz erkennen. In der statischen Simulation wird die Lenkdämpfung am ehesten als etwas zu stark bewertet.

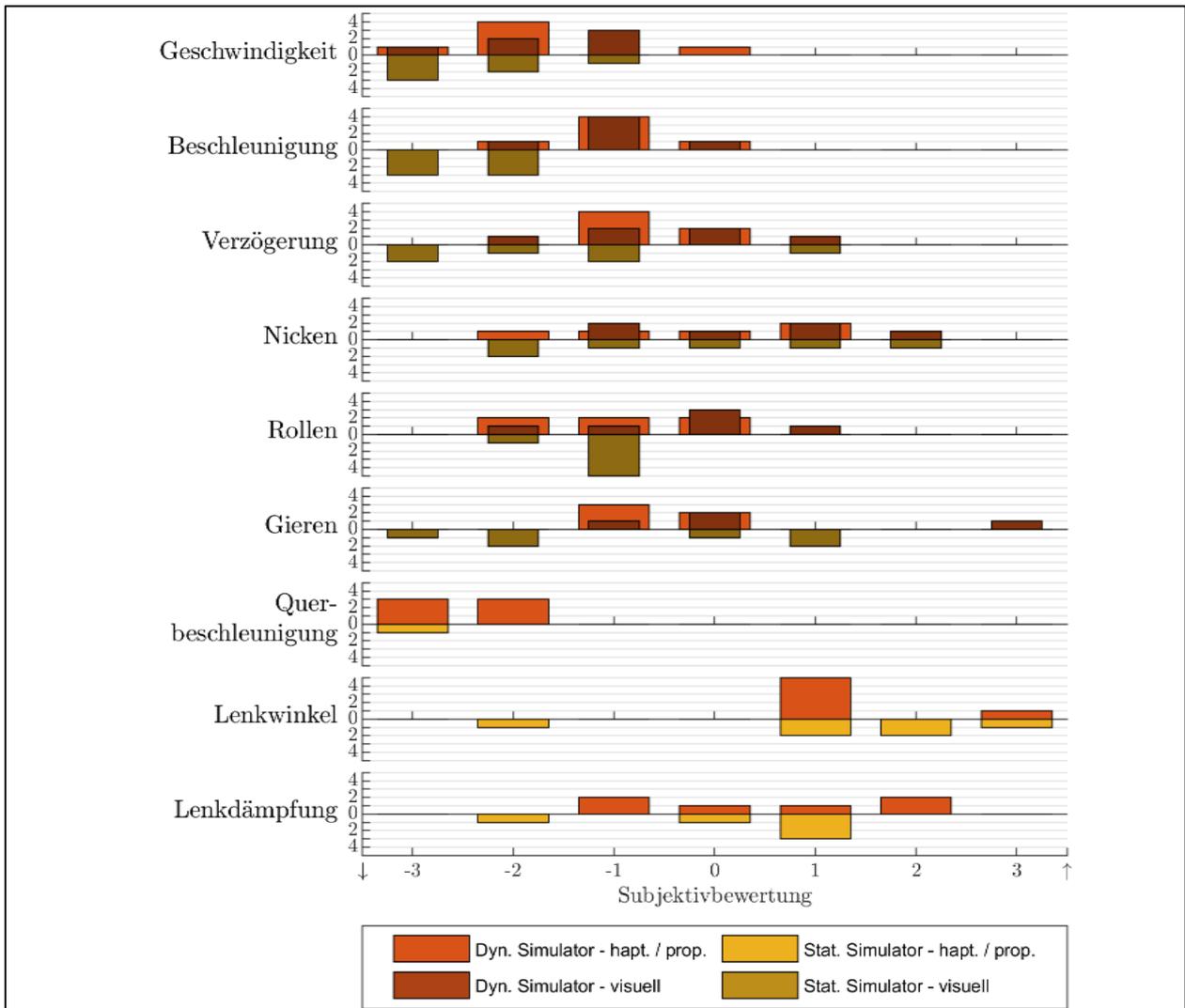


Bild 4-30: subjektive Bewertung der beiden Simulationsumgebungen getrennt nach visueller und haptisch / propriozeptiver Rückmeldung.

Abschließend werden die akustischen Rückmeldungen die den Fahrern zur Verfügung gestellt werden betrachtet. Die akustischen Rückmeldungen beider Simulatoren werden als etwas unrealistisch (Bild 4-31 links) und etwas zu leise bewertet (Bild 4-31 rechts). Insgesamt wurde das Fehlen von Windgeräuschen bemängelt. Außerdem wird für beide Simulatoren angemerkt, dass die Motorengeräusche synthetisch klingen.

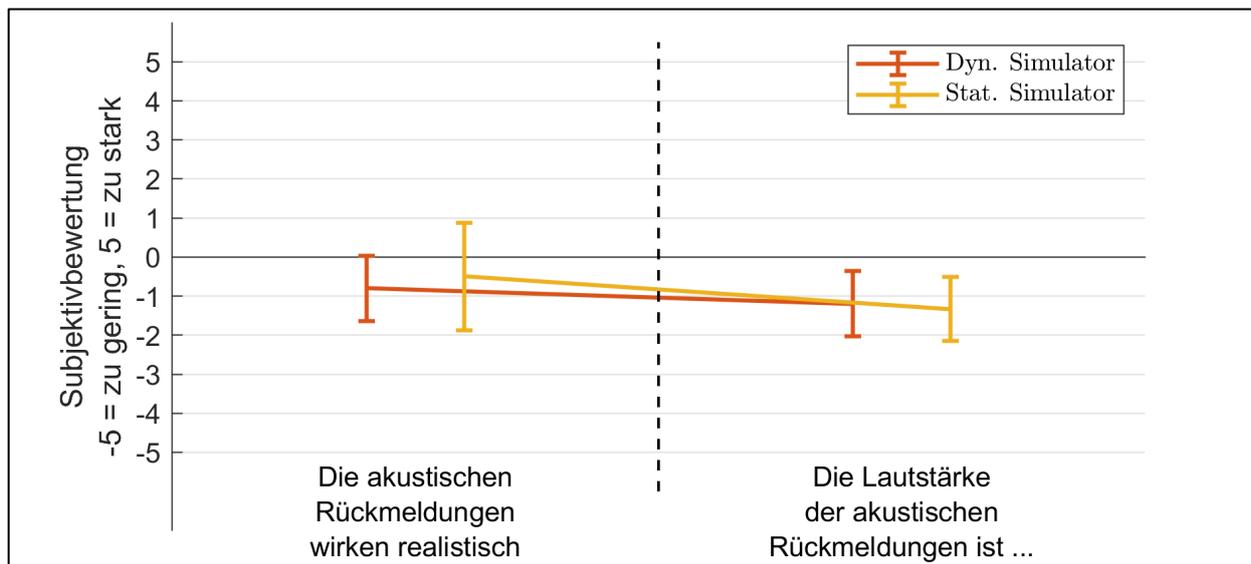


Bild 4-31: Mittlere Bewertung der Fragen: "Die akustischen Rückmeldungen wirken realistisch" und "Die Lautstärke der akustischen Rückmeldungen ist...", aufgeteilt nach den Simulatoreausbaustufen statisch und dynamisch.

### Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Nachbefragung

Zur späteren Diskussion wird für die Ergebnisse aus der Nachbefragung Folgendes festgehalten:

<b>NB1</b>	Die Fahrer bewerteten den dynamischen Simulator bezüglich der Lenkung und bezüglich des Gesamteindrucks als realistischer, als den statischen Motorradsimulator.
<b>NB2</b>	Für beide Simulatoren gaben die Fahrer an, dass eine Führung des Fahrzeugs gut möglich gewesen sei. Ein Teil der Fahrer gab jedoch Schwierigkeiten bei der Überblickbarkeit der virtuellen Welt im Falle des dynamischen Simulators an.
<b>NB3</b>	Das Präsenzerleben wurde für die dynamische Simulation tendenziell besser bewertet, als für die statische Simulation.
<b>NB4</b>	Für die Stabilisierung der Simulatoren über die Geschwindigkeitsbereiche zeigt sich in der dynamischen Simulation mit zunehmender Geschwindigkeit eine stärkere Entsprechung der Stabilisierungseffekte mit der Realfahrt. In der statischen Simulation wird die Stabilisierung insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten als zu hoch bewertet. Die Kurvenstabilität wird für den dynamischen Motorradsimulator als zu gering bewertet.
<b>NB5</b>	Visuelle und haptisch / propriozeptive Rückmeldungen der Fahrdynamik werden in beiden Simulationsumgebungen als zu schwach bewertet, wobei der dynamische Motorradsimulator etwas bessere Bewertungen erhält.

### 4.3 Diskussion der Ergebnisse - Verifikationsstudie

Für die objektiven Fahrparameter zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen rein längsregulatorischen Fahraufgaben und Kurvenfahrten. Während insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten die Stabilisierung des dynamischen Motorradsimulators eine große Herausforderung darstellte, zeigte sich für die fahrerseitige Regelung eine akzeptable Übereinstimmung zwischen dynamischer Simulation und Realfahrt. Nach gegenwärtigem Stand empfiehlt sich der dynamische Motorradsimulator jedoch nicht für Studien, die eine Abbildung der Beanspruchung aus der Realfahrt erfordern. Dies begründet sich insbesondere durch die unzureichende Eigenschaftsbilddarstellung des Simulators. Die Stabilisierung ist für trainierte Probanden zwar gut möglich, stellt jedoch eine höhere Beanspruchung dar, als in der Realfahrt. Für derartige Fragestellungen stellt deswegen nach aktuellem Entwicklungsstand der statische Motorradsimulator das Werkzeug der Wahl dar. Dennoch zeigt der dynamische Motorradsimulator Potentiale hinsichtlich der Rückmeldungen an den Fahrer. Da sich das Beanspruchungsniveau nahezu konstant von der Realfahrt unterscheidet, liegen Indizien für das Vorhandensein relativer Validität vor. Dennoch erscheinen weitere Entwicklungsarbeiten hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens sinnvoll. Die statische Simulation zeigte sich im Gegensatz dazu als übermäßig stabil, sodass keine hinreichende Darstellung der fahrdynamischen Charakteristika eines Motorrads erfolgt. Hierbei zeigt sich, dass sich das Verhalten eines Fahrersimulators für unterschiedliche Fahraufgaben deutlich unterscheiden kann, was wiederum nahe legt, dass eine Definition eines Simulators ausschließlich über die adressierten Sinneskanäle nicht hinreichend ist, da auch berücksichtigt werden muss, auf welche Weise die Hardware des jeweiligen Simulators angesteuert wird (vgl. CAIRD & HORREY, 2011).

Auch auf Ebene der fahrerseitigen Regelung zeigten sich deutliche Unterschiede, sodass am statischen Simulator insbesondere bezüglich der Gasdrehgriffstellung eine permanente Regelung in einem sehr großen Regelbereich festgestellt werden konnte. Ursachen hierfür können sowohl in der mangelnden Geschwindigkeitsrückmeldung als auch in der Verwendung eines Automatikgetriebes liegen, was sich mit der Annahme deckt, dass die Wiedergabetreue einen Einfluss auf das Fahrverhalten nimmt (z.B. LEONARD JR & WIERWILLE, 1975 nach ZÖLLER, 2015).

In den beiden Sequenzen, die sich mit dem Fahren von Kurven beschäftigten, wurden deutliche Unterschiede zwischen den beiden Simulationsumgebungen identifiziert. Für die statische Simulation zeigen sich sowohl auf Ebene der Umsetzung von Rollwinkel, Lenkwinkel und Lenkmoment als auch für das Fahrerverhalten deutliche Abweichungen von der Realfahrt. In der dynamischen Simulation stimmen diese Größen besser überein. Dennoch zeigt sich abermals eine größere wahrgenommene Instabilität im Fahrzeugrollwinkel. Auf Grund der Streckengeometrie konnten größere Kurvenradien bei höheren Geschwindigkeiten nicht untersucht werden. Da sich bei Geradeausfahrt in höheren Geschwindigkeiten ein stabileres Verhalten des dynamischen Simulators zeigt und auch die Bewertung der Untersuchungsteilnehmer diesem Ergebnis entspricht, kann vermutet werden, dass auch eine stabilere Kurvenfahrt in der dynamischen Motorradsimulation bei höheren Geschwindigkeiten erzielt werden könnte. Dennoch kann für mögliche Fragestellungen, die das Fahren von Kurven als Kernaufgabe enthalten, von einer besseren Eignung des dynamischen Motorradsimulators ausgegangen werden, da eine propriozeptive bzw. vestibuläre Rückmeldung des Rollwinkels gegeben wird, der Rollwinkel in seiner absoluten Höhe besser übereinstimmt und natürliche Instabilitäten abgebildet werden können. Hierfür sei erneut auf die Annahme verwiesen, dass die Wiedergabetreue einen Einfluss auf das Fahrverhalten habe (LEONARD JR & WIERWILLE, 1975 nach ZÖLLER, 2015)

Auf Ebene der Fahrerbeanspruchung konnte gezeigt werden, dass die erlebte Beanspruchung zwischen statischer Simulation und Realfahrt in Bezug auf die absolute Höhe übereinstimmt. Dieses Ergebnis entspricht der Forderung Espiés nach einer Übereinstimmung des Beanspruchungsniveaus für die Nutzung in Human-Factors-Fragestellungen (ESPIÉ ET AL., 2005). Bei der dynamischen Motorradsimulation zeigt sich über alle Minimalszenarien hinweg ein insgesamt höheres Beanspruchungsniveau im Vergleich zur Realfahrt und der statischen Simulation. Das Muster der Beanspruchung über die verschiedenen Minimalszenarien hinweg blieb jedoch das Gleiche, was der Definition von relativer Validität nach CAIRD & HORREY (2011) auf qualitativer Ebene entspricht. Zusätzlich zeigte sich für die dynamische Motorradsimulation im Allgemeinen eine hohe Streuung in der erlebten Beanspruchung. Ursache hierfür können unterschiedlich ausgeprägte Fertigkeiten im Umgang mit diesem Simulator sein. Für die Kurvenszenarien

muss zusätzlich angemerkt werden, dass auf Grund der räumlichen Gegebenheiten nur Kurven im Geschwindigkeitsbereich bis maximal 70 km/h gefahren werden konnten. Die Eignung des dynamischen Motorradsimulators bei Kurvenfahrten mit höheren Geschwindigkeiten kann daher auf Basis der Verifikationsstudie nicht abschließend beurteilt werden und bedarf weiterer Untersuchung.

Aus der Nachbefragung hat sich ergeben, dass die Realitätstreue und die Rückmeldungen des dynamischen Motorradsimulators konsistent als besser beurteilt wurden. Die bessere subjektive Bewertung des dynamischen Simulators steht in Einklang mit den Aussagen von BLANA (1996) und STEDMON ET AL. (2009), wonach eine bessere subjektive Bewertung die Folge einer höheren Wiedergabetreue sein kann, die sich aber nicht zwingend in den objektiv messbaren Parametern niederschlagen muss.

Dennoch wurden insbesondere haptische / propriozeptive Rückmeldungen als etwas zu schwach erlebt, was mit der Aussage von ESPIÉ ET AL. (2005) übereinstimmt, wonach selbst komplexe technische Aufbauten nur bedingt die dynamischen Möglichkeiten eines Realfahrzeugs abbilden können. Auch zeigte sich ein insgesamt höheres Präsenzerleben, was sich mit dem eher technischen Präsenzkonzzept von ZELTZER (1992) und WITMER & SINGER (1994) deckt (vgl. auch WILL, 2017).

Insgesamt spricht die Heterogenität der einzelnen Betrachtungsebenen den Empfehlungen, die bereits 1982 von BLAAUW gegeben wurden, da bei einer reinen Betrachtung des Fahrzeugverhaltens weder Regelabweichungen der Fahrer noch systematische Beanspruchungsunterschiede hätten entdeckt werden können.

Entsprechend der geschilderten Beobachtungen, die in der Verifikationsstudie gemacht wurden, lassen sich Fahraufgaben ableiten, die die beschriebenen Phänomene näher beleuchten sollen. Wie eingangs erläutert, sollen hierdurch erste Schlüsse hinsichtlich der Additivität der Minimalszenarien und damit der ableitbaren Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren möglich werden.

## 5 Probandenstudie

### 5.1 Methodik der Probandenstudie

Im Folgenden wird die Methodik der Probandenstudie vorgestellt. Dies unterteilt sich in die Vorstellung der Messaufbauten, der subjektiven Befragung, der Beschreibung der Fahraufgaben, der gewählten Stichprobe und die Beschreibung des Versuchsablaufs.

#### 5.1.1 Messaufbau und Messgrößen

Für die Durchführung der Probandenstudie wurden ein Messmotorrad des Typs KTM 790 Duke, der dynamische DESMORI-Motorradsimulator und der statische Simulator der WIVW GmbH verwendet. Die Beschreibung des Realfahrzeugs folgt in diesem Teilkapitel. Die Beschreibung des statischen und des dynamischen Motorradsimulators findet sich unter Kapitel 4.1.1. Die Auflistung der erfassten Messgrößen ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.



Bild 5-1: Dynamischer DESMORI-Motorradsimulator (links), KTM 790 Duke mit Messtechnik (Mitte), statischer Motorradsimulator der WIVW GmbH (rechts).

### Kurzbeschreibung des Messmotorrads

Im Rahmen der Probandenstudie wurde eine KTM 790 Duke als Messmotorrad eingesetzt (Bild 5-2). Das Fahrzeug verfügt über einen 799 cm<sup>3</sup> 2-Zylinder Reihenmotor mit einer Leistung von 77 kW (103 PS). Das Motorrad ist serienmäßig mit Technik und Assistenzsystemen nach aktuellem Stand der Technik ausgestattet. Hierunter fallen eine IMU (Inertial Measurement Unit), ein Kurven-ABS und eine schräglagenabhängige Traktionskontrolle. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Sitzhöhe, der aufrechten Sitzposition und des geringen Gewichts von 187 kg eignet sich das Fahrzeug für eine breite Probandenpopulation. Zudem kann mit der verwendeten Messtechnik direkt auf die bordeigene Sensorik zugegriffen werden, sodass zur Erfassung der relevanten Parameter, wie z.B. Rollwinkel, Rollrate und Geschwindigkeit keine zusätzliche Sensorik verbaut werden muss. Die gesamte Messtechnik befindet sich in einem speziell angefertigten Alu-Seitenkoffer, der links am Heck des Messmotorrads befestigt ist. Relevante Parameter werden über eine CAN-Schnittstelle zur Verfügung gestellt und mit Hilfe eines Intel NUC mit SILAB<sup>®</sup> aufgezeichnet. Die Aufzeichnungsrate beträgt 60 Hz. Zusätzlich werden Positionsdaten mit Hilfe eines Navilock USB-Empfängers und einer Abtastrate von 5 Hz ebenfalls aufgezeichnet. Zur Erfassung/ Ausgabe analoger Signale wurde ein Arduino verbaut, mit dem z.B. die Bedienung von Tastern bei Bedarf erfasst werden kann. Die unterbrechungsfreie Spannungsversorgung der Messtechnik wird durch eine Zweitatterie mit Ladestromregelung sichergestellt. Die Ursache für den Wechsel des Fahrzeugs liegt in den Sperrungen des Testgeländes in Griesheim begründet, aufgrund derer ein Wechsel des Testgeländes stattfand. Da hierdurch ein regelmäßiger An- und Abtransport des Messmotorrads notwendig geworden wäre, wurde im Rahmen der Probandenstudie auf das hier vorgestellte Fahrzeug zurückgegriffen. Wenngleich dieses eine höhere Leistung besitzt, folgt es dem gleichen Motorkonzept, ist Einsteigertauglich und besitzt eine ähnliche, aufrechte Ergonomie wie das zuvor genutzte Messmotorrad.

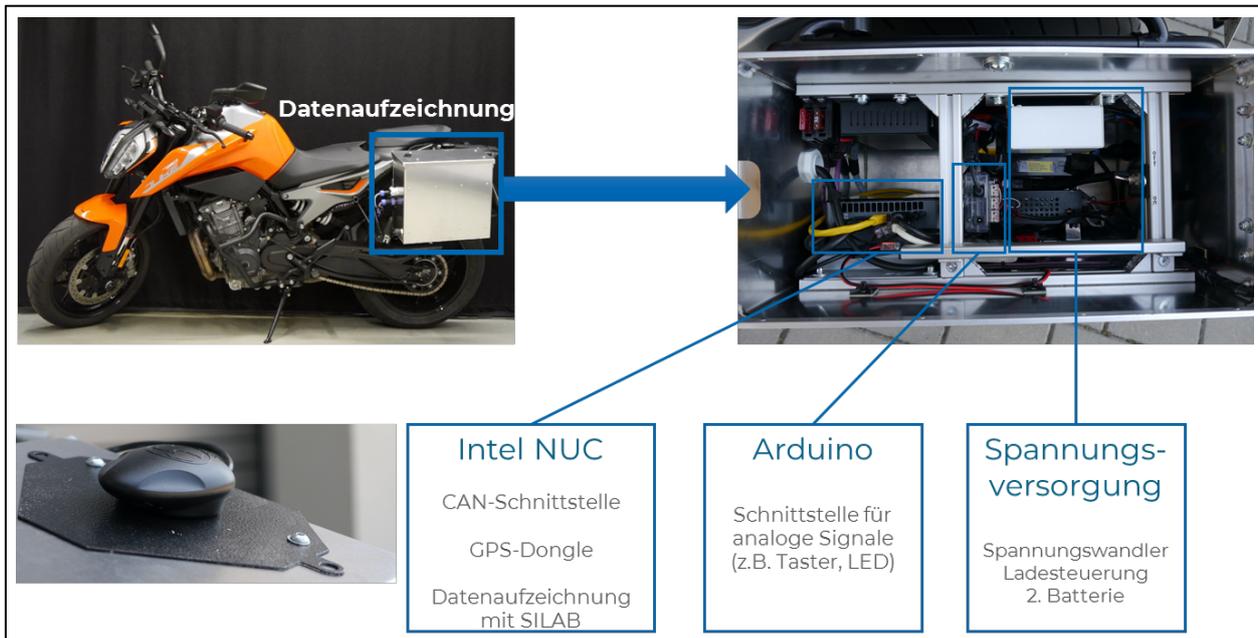


Bild 5-2: KTM 790 Duke (links oben) mit Detailaufnahmen der Messtechnik.

Sowohl am Messmotorrad als auch den Simulatoren wird ein selbstentwickeltes HMI verwendet (Bild 5-3). Hierdurch kann in allen Umgebungen am gleichen Ort die Instruktion für die Fahraufgaben gegeben werden (siehe Kapitel 5.1.2). Hierfür wird ein 7 Zoll Display des Typs Lilliput 779GL-70NP/C/T verwendet.



Bild 5-3: Generisches Motorrad-HMI der WIVW GmbH.

### Subjektive Befragung

Im Rahmen der Probandenstudie wurde eine eindimensionale Befragung zur Erfüllung der Fahraufgabe und zur Beanspruchung des Fahrers verwendet, wobei die Frage zur Beanspruchung lediglich bei der Nebenaufgabenbearbeitung während der Fahrt verwendet wurde (Bild 5-4).

Wie gut konnten Sie die Fahraufgabe umsetzen?

Gar nicht	Sehr schlecht			Schlecht			Mittel			Gut			Sehr gut		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Wie sehr hat Sie die Bearbeitung der Nebenaufgabe beansprucht?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Bild 5-4: Befragungsskalen der Probandenstudie.

Neben der Befragung nach den Fahraufgaben wurde eine Nachbefragung durchgeführt (Anhang 11.1), die eine verkürzte Version der Nachbefragung aus der Verifikationsstudie darstellte. Hierbei wurde auf die Befragung zu den visuellen und haptisch/ propriozeptiven Rückmeldungen der fahrdynamischen Parameter durch die Simulatoren verzichtet.

### 5.1.2 Fahraufgaben

Die Untersuchung untergliederte sich in drei Abschnitte, die jeder Fahrer in allen drei Versuchsumgebungen absolvierte. Hierbei handelte es sich um eine Ausweich- bzw. eine kombinierte Brems-Ausweichaufgabe, eine Nebenaufgabenbedienung während einer Ovalfahrt und eine Realfahrt im öffentlichen Straßenverkehr, die ohne weitere Aufgaben erfolgte. Im Folgenden werden die drei Untersuchungsblöcke näher vorgestellt.

### Ausweich- / Brems-Ausweich-Szenario

Die Aufgabe der Fahrer bestand darin, einer aufgestellten Pylonengasse mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h zu folgen. Die Grundform des Pylonenparcours bestand aus zwei Kreissegmenten, die durch gerade Zwischenstücke verbunden waren, sodass ein ovalartiger Grundparcours entsteht. In die südliche verbindende Gerade waren weitere Pylonen eingebunden, die die eigentlichen Ausweich- bzw. Brems-Ausweich-Szenarien darstellten (Bild 5-5, unterer Teil). Die Aufgabe der Fahrer bestand darin, auf eine im Display dargestellte Farbe zu reagieren. Dabei korrespondierten die möglichen Farben im Display, mit den Farben der Pylone (Bild 5-5, oberer Teil). Für jede Messfahrt wurde der Ovalparcours einmal durchfahren, ohne dass ein Ausweichmanöver durchgeführt wurde. In der zweiten Runde erhielt der Fahrer die Instruktion über die Zustandsänderung des Displays. Diese wurde an einem festgesetzten Wegpunkt, der dem Probanden instruiert wurde, durch den Versuchsleiter per Funkfernbedienung emittiert. Vor Beginn der Messfahrten wird die Fahraufgabe ausgiebig geübt.

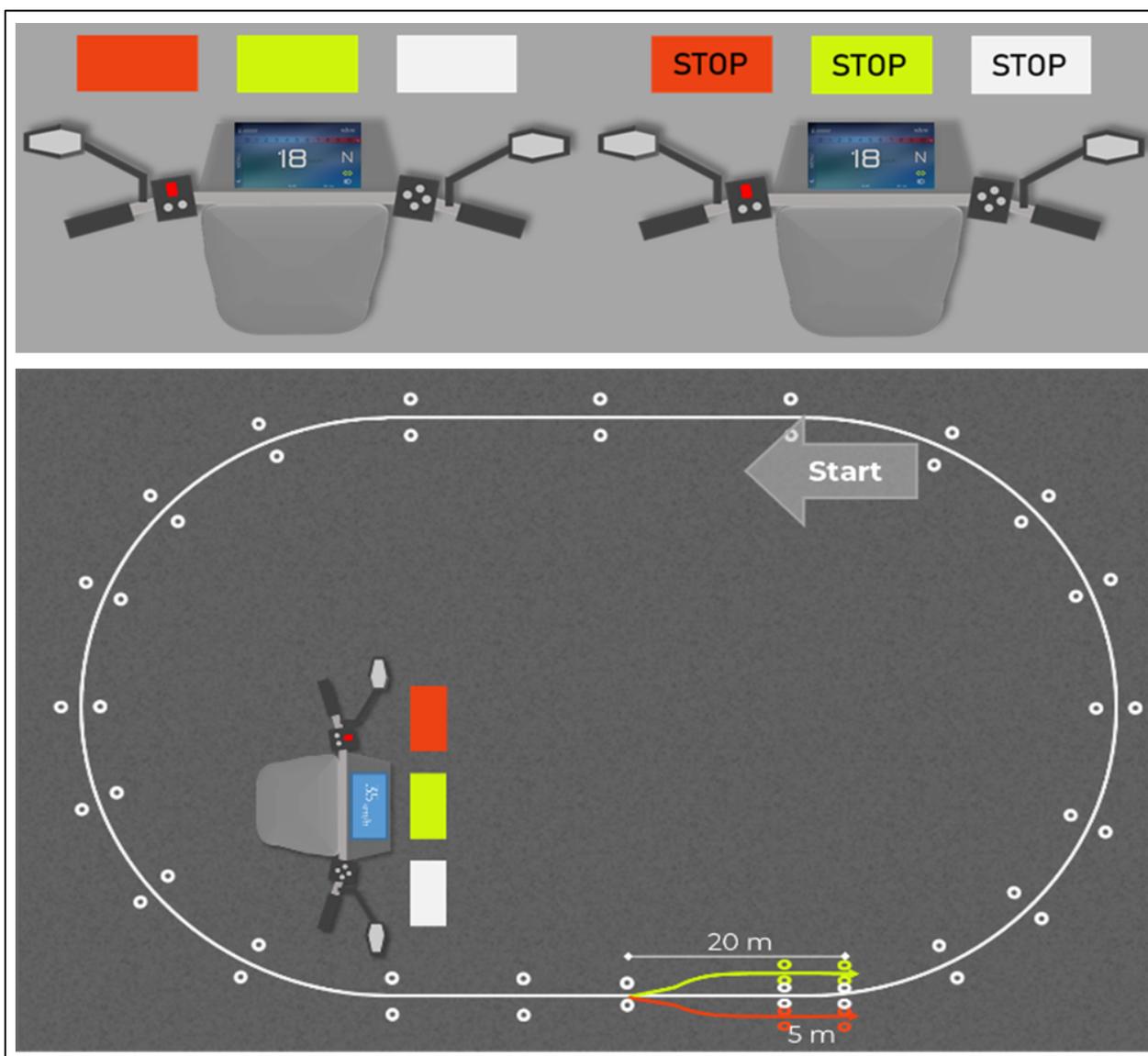


Bild 5-5: Darstellung der Aufgabe „Ausweichen“. Der Fahrer beginnt an der „Start-Markierung“ mit der Fahraufgabe. Das Oval wird zunächst einmal vollständig durchfahren. In der zweiten Runde erscheint auf Höhe des schematischen Motorradlenkers die farbige Hervorhebung des Displays. Hierdurch wird dem Fahrer signalisiert, welche Pylonengasse durchfahren werden soll. Die Zielgeschwindigkeit für die gesamte Fahraufgabe beträgt 35 km/h.

Für die Aufgabe wurden folgende Minimalszenarien miteinander kombiniert: MSZ 1: konstante Geradeausfahrt, MSZ 7: Kurveeinleiten, MSZ 8: Kurveausleiten, MSZ 1: konstante Geradeausfahrt, MSZ 7: Kurveeinleiten (nach Abschluss des Ausweichvorgangs). Für die zweite Variante werden die Minimalszenarien: MSZ 1: konstante Geradeausfahrt, MSZ 7: Kurveeinleiten ODER MSZ 9: Bremsung beim Kurveeinleiten, MSZ 4: Zielbremsung in den Stand.

### Nebenaufgabenbearbeitung während der Fahrt

Der zweite Teil der Probandenstudie bestand aus der Bearbeitung des Rapid Serial Visual Presentation Task (RSVP) während der Fahrt. Dies ist eine visuell-manuelle Nebenaufgabe, bei der die Aufgabe des Probanden darin besteht, auf zuvor definierte Stimuli (Zahlen, die im Display dargestellt wird) per Tastendruck zu reagieren und die dargestellten Distraktoren (Buchstaben) zu ignorieren (Bild 5-6). Folglich wurde im Vergleich zur Betrachtung des PDT eine Aufgabe gewählt, die weniger auf die allgemeine Beanspruchung des Fahrers, als auf die Nachbildung der Anforderungen einer HMI-Bedienung am Motorrad abzielt, gewählt. Durch dieses Vorgehen soll folglich eine Kombination von Minimalszenarien mit einer weiteren Aufgabe entstehen, die dem Anwendungsfall einer HMI-Untersuchung nahekommt. Während der Bearbeitung des RSVP bestand die Aufgabe des Fahrers darin, die ovalförmige Pylonengasse mit einer selbstgewählten Geschwindigkeit zu durchfahren und der sicheren Durchführung der Fahraufgabe stets Vorrang zu geben. Vor der Bearbeitung des RSVP während der Fahrt, wurde eine Baseline-Messung im Stand durchgeführt. Im Anschluss daran wurde die Bearbeitung während der Fahrt durchgeführt, wobei die Strecke jeweils einmal mit und einmal gegen den Uhrzeigersinn durchfahren wurde, um Effekte einer möglicherweise präferierten Fahrtrichtung auszugleichen. In den Fahrten wurden jeweils acht Runden im Oval gefahren, wobei die ersten drei Runden ohne Bearbeitung des RSVP durchfahren wurden. In diesen Runden bestand die Aufgabe der Fahrer darin, mit möglichst konstanter Geschwindigkeit das Oval zu durchfahren. Während der Eingewöhnungsrunden verfügten die Fahrer über eine Geschwindigkeitsanzeige, die nach der Aktivierung des RSVP nicht mehr sichtbar war. Nach Abschluss der dritten Runde, wurde durch den Versuchsleiter ein Zeichen gegeben und mit der Bearbeitung des RSVP begonnen. Die Aktivierung der Aufgabe erfolgte dabei über eine Betätigung der Lichthupe. Die Fahrer bearbeiteten den RSVP für weitere fünf vollständige Runden. Durch ein erneutes Zeichen des Versuchsleiters wurde die Fahrt beendet.

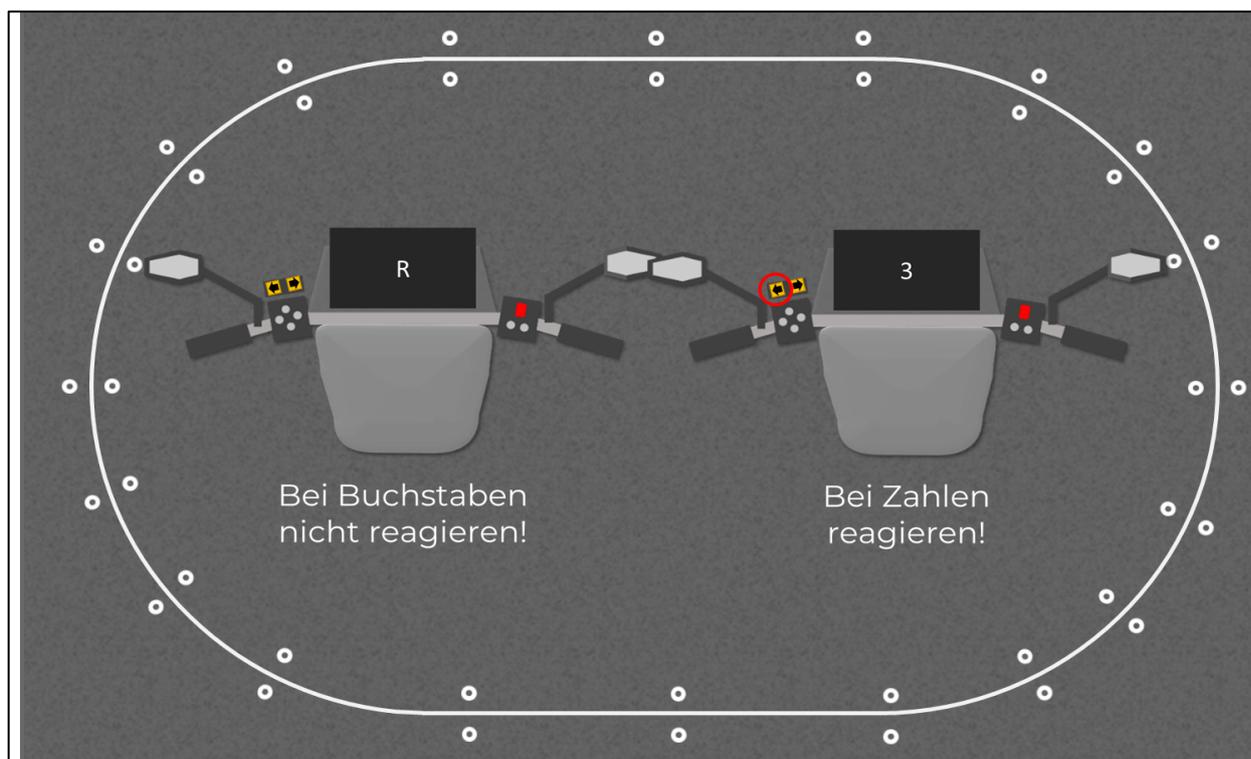


Bild 5-6: Darstellung der Aufgabe „RSVP“. Die Aufgabe des Fahrers besteht darin, das dargestellte Oval zu durchfahren. Die Geschwindigkeit ist während der Aufgabe selbst (zwischen 30 und 40 km/h) zu wählen und konstant zu halten. Während der Fahraufgabe besteht die Nebenaufgabe des Fahrers darin, den RSVP zu bearbeiten.

Für die Aufgabe wurden folgende Minimalszenarien miteinander kombiniert: MSZ 1: konstante Geradeausfahrt, MSZ 7: Kurveinleiten, MSZ 8: Kurveausleiten sowie der in Abhängigkeit des Fahrverhaltens potentiell auftretenden: MSZ 3: Zielbeschleunigung, MSZ 5 Anpassungsbremmung, MSZ 9: Bremsung beim Kurveinleiten und MSZ 12: Beschleunigen beim Kurveausleiten.

### Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr

Die dritte Fahrt, die die Probanden absolvierten, war eine Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Hierfür wurde eine Strecke in der Nähe des WIVW ausgewählt, die i.d.R. schwach frequentiert ist und aus einer moderat kurvigen Strecke und einer Ortsdurchfahrt besteht. Die Strecke wurde detailgetreu in der Simulationssoftware SILAB® nachgebildet und mit GPS-Koordinaten hinterlegt. Die Aufgabe der Fahrer bestand darin, die Strecke im Rahmen der Straßenverkehrsordnung zu durchfahren. Im Falle der Realfahrt, wurden zusätzlich Ereignisse, wie langsame Vorderfahrzeuge oder andere Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten erfasst, da diese nicht kontrolliert werden konnten.



Bild 5-7: Versuchsstrecke im öffentlichen Straßenverkehr (© OpenStreetMap-Mitwirkende).

### 5.1.3 Probanden

An der Untersuchung nahmen insgesamt  $N = 15$  Motorradfahrer, mit einem mittleren Alter von  $M = 37$  Jahren ( $SD = 14$  Jahre), teil (davon eine weibliche Person). Alle Versuchsteilnehmer verfügten zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse A. Die durchschnittliche Fahrleistung in den vergangenen 12 Monaten lag bei  $M = 7\,300$  km ( $min = 1\,000$  km;  $max = 25\,000$ ;  $SD = 7\,496$  km).

### 5.1.4 Ablauf

Alle Versuchsteilnehmer der Probandenstudie nahmen in allen Umgebungen an der Studie teil. Die Erhebung auf dem Realfahrzeug fand im Falle der Ausweich- und Bremsaufgabe und der Bedienung des RSVP während der Fahrt auf einem abgesperrten Testgelände in der Nähe des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften statt. Die Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr fand auf einer öffentlichen Straße, ebenfalls in der Nähe des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften, statt. Der Erhebungszeitraum erstreckte sich von Oktober 2019 bis März 2020. Entgegen der Verifikationsstudie wurde die Untersuchung für alle

Probanden in der Realfahrt begonnen, da der Beginn des Erhebungszeitraums im Herbst lag. Die Reihenfolge der beiden Simulatorfahrten wurde hingegen permutiert. Zusätzlich wurde für alle Probanden ein Training am statischen Motorrad Simulator der WIVW GmbH entwickelt und durchgeführt<sup>7</sup>.

Die Probanden wurden bei ihrem ersten Termin über den Zweck der Studie, die aufgezeichneten Daten und den Umgang mit diesen (gemäß DSGVO) aufgeklärt. Im Zuge dessen wurde ein „Informed Consent“-Dokument ausgefüllt und unterschrieben. Zusätzlich erhielten die Fahrer ein Dokument zur Aufklärung für Realfahrtversuche.

Nach Abschluss der Formalien wurden die Probanden über Ziel und Ablauf der Studie informiert. Im Anschluss daran wurde (unabhängig von der Versuchsumgebung) eine freie Eingewöhnungsfahrt durchgeführt. Den Probanden sollte somit ermöglicht werden sich an das Fahrzeug / den jeweiligen Simulator zu gewöhnen. Außer der maximal erlaubten Geschwindigkeit wurden keine weiteren Instruktionen gegeben. Im Anschluss an die Eingewöhnung wurde das Manöver Ausweichen / bzw. Ausweichen und Bremsen geübt, sodass die Fahraufgabe von den Teilnehmern sicher beherrscht wurde. Nach Abschluss der Übungsphase wurden die Messfahrten durchgeführt. Nach jedem Durchgang fand eine Befragung der Fahrer statt. Insgesamt wurde dieser Versuchsteil sechsmal durchgeführt. Im darauffolgenden Versuchsabschnitt, in dem eine Nebenaufgabe während der Fahrt absolviert werden sollte, wurde nach der Eingewöhnung zunächst eine Baseline-Messung des RSVP im Stand durchgeführt. Anschließend wurde in permuierter Reihenfolge die Bedienung im, bzw. gegen den Uhrzeigersinn durchgeführt. Auch hierbei fand eine Befragung nach den Messungen statt. Die Erhebung der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr fand im Falle der Realfahrt an einem gesonderten Termin statt; bei den beiden Simulatorfahrten wurde diese in den Termin integriert.

Am Ende der beiden Simulatorversuche fand eine Nachbefragung zu den Simulatoren statt, die weitestgehend der Abschlussbefragung der Verifikationsstudie entspricht, jedoch auf die Detailbefragungen zur Fahrdynamik verzichtet. Nach Abschluss des letzten Termins erhielten die Probanden ihre Aufwandsentschädigung.

### 5.1.5 Statistische Auswertung

Die statistischen Auswertungen erfolgten mit der Software StatSoft® Statistica. Gemäß vorliegender Testvoraussetzungen wurden inferenzstatistische Betrachtungen der verschiedenen Versuchsumgebungen mittels Varianzanalysen durchgeführt. Als Effektstärkemaß wird das partielle Eta-Quadrat  $\eta^2$  berichtet. Im Falle statistisch signifikanter Varianzanalysen wurden Scheffé-Tests zur Post-hoc Auswertung berechnet. Zweigruppenvergleiche wurden mit Hilfe von t-Tests analysiert, deren statistische Ergebnisse mit Cohen's D als Effektstärkemaß angereichert werden (BORTZ, 2013). Als Signifikanzniveau wird  $\alpha = .05$  angenommen.

---

<sup>7</sup> Das Training wurde eingeführt, da alle Fahrer bereits am dynamischen Simulator trainiert wurden. Um gleiche Voraussetzungen für den statischen Motorrad Simulator zu schaffen, wurde ein analoges Training am statischen Motorrad Simulator aufgebaut.

## 5.2 Ergebnisse – Probandenstudie

Die folgende Darstellung der Ergebnisse der Probandenstudie folgt den drei Blöcken ‚Ausweichen und Bremsen‘, ‚Nebenaufgabenbedienung während der Fahrt‘, ‚Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr‘ und ‚Nachbefragung‘.

### 5.2.1 Ausweichen und Bremsen

Analog zur Betrachtung der Ergebnisse aus der Verifikationsstudie soll auch für die Probandenstudie je betrachteter Fahraufgabe zunächst ein Verlauf gezeigt werden, der alle Fahrer gemeinsam darstellt, um einen Eindruck über Streuungsgrößen und qualitative Unterschiede zwischen den Probanden zu erlangen. In Bild 5-8 oben wird die Trajektorie der Ausweichaufgabe (Bild 5-5) dargestellt. Hierbei muss im Falle der Realfahrt berücksichtigt werden, dass die große Streuung der Fahrer nicht auf Heterogenität im Fahrverhalten zurückgeführt werden kann (Bild 5-8, linke Spalte). Stattdessen liegt die Ursache in Ungenauigkeiten, die durch die GPS-Erfassung zustande kommen. Im Gegensatz dazu stellen sämtliche Streuungen in der dynamischen und statischen Simulation tatsächliche Abweichungen dar (Bild 5-8, mittlere und rechte Spalte). Wie bereits in der Verifikationsstudie zeigt sich in der dynamischen Simulation eine größere Unregelmäßigkeit in den Verläufen, als es in der dynamischen Simulation der Fall ist. Im Gegensatz dazu zeigt sich in der statischen Simulation ein äußerst homogenes Verhalten.

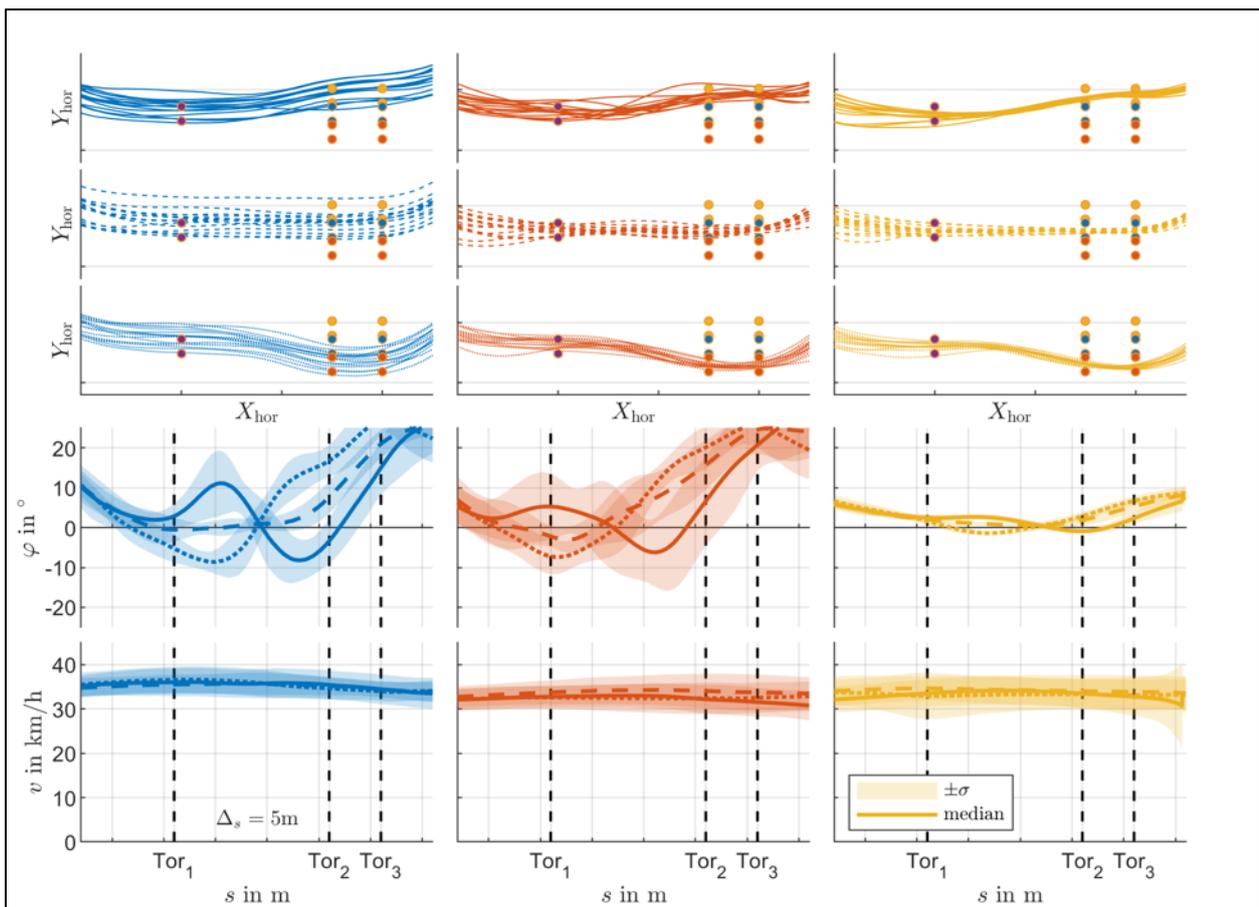


Bild 5-8: Darstellung der gefahrenen Trajektorie für die Aufgabe Ausweichen, getrennt nach Umgebung (v.l.n.r.: Realfahrt, dynamische Simulation, statische Simulation) und Ausweichrichtung (v.o.n.u.: links, geradeaus, rechts). Darunter die über das Probandenpanel gemittelten Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung.

Unter den gezeigten Trajektorienverläufen in der Draufsicht sind die Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeit über der zurückgelegten Strecke aufgetragen. Die Linien stellen dabei jeweils den Mittelwert des Probandenpanels dar, der Streubereich ist als transparente Fläche überlagert dargestellt. Dadurch wird erneut der größere Streubereich des Rollwinkels am dynamischen Simulator erkennbar, während die statische Simulation jede Art der Unruhe und Instabilität ungezeigt lässt.

Betrachtet man die Verläufe der Trajektorie für das Manöver Ausweichen und Bremsen, zeigen sich auf makroskopischer Ebene ähnliche Charakteristika der Verläufe wie im Manöver Ausweichen (Bild 5-9). Bis auf eine Ausnahme beim Ausweichen und Bremsen nach links am dynamischen Simulator (hier aufgrund des Wertebereichs nicht abgebildet), konnten alle Probanden alle Aufgaben erfolgreich beenden und innerhalb der gesteckten Grenzen zum Stehen kommen. Im Rollwinkelverlauf ist insbesondere kurz vor dem Stillstand die erwartete Instabilität in der Realfahrt sowie dem dynamischen Simulator zu erkennen. Die unruhigen Verläufe auch im Geschwindigkeitsverlauf resultieren durch die unterschiedliche Anzahl an Probanden, welche zur Mittelwertbildung herangezogen wird, da unterschiedliche Endpunkte erreicht werden und somit stets weniger Datenpunkte im späteren Streckenverlauf verfügbar sind.

Im Vergleich zur Verifikationsstudie zeigen die jeweiligen Versuchsumgebungen vergleichbare Charakteristika, die auftreten, obgleich die Minimalszenarien anders angeordnet wurden. Dieses Ergebnis spricht für die Gültigkeit von Annahme 2 (Additivität der Minimalszenarien).

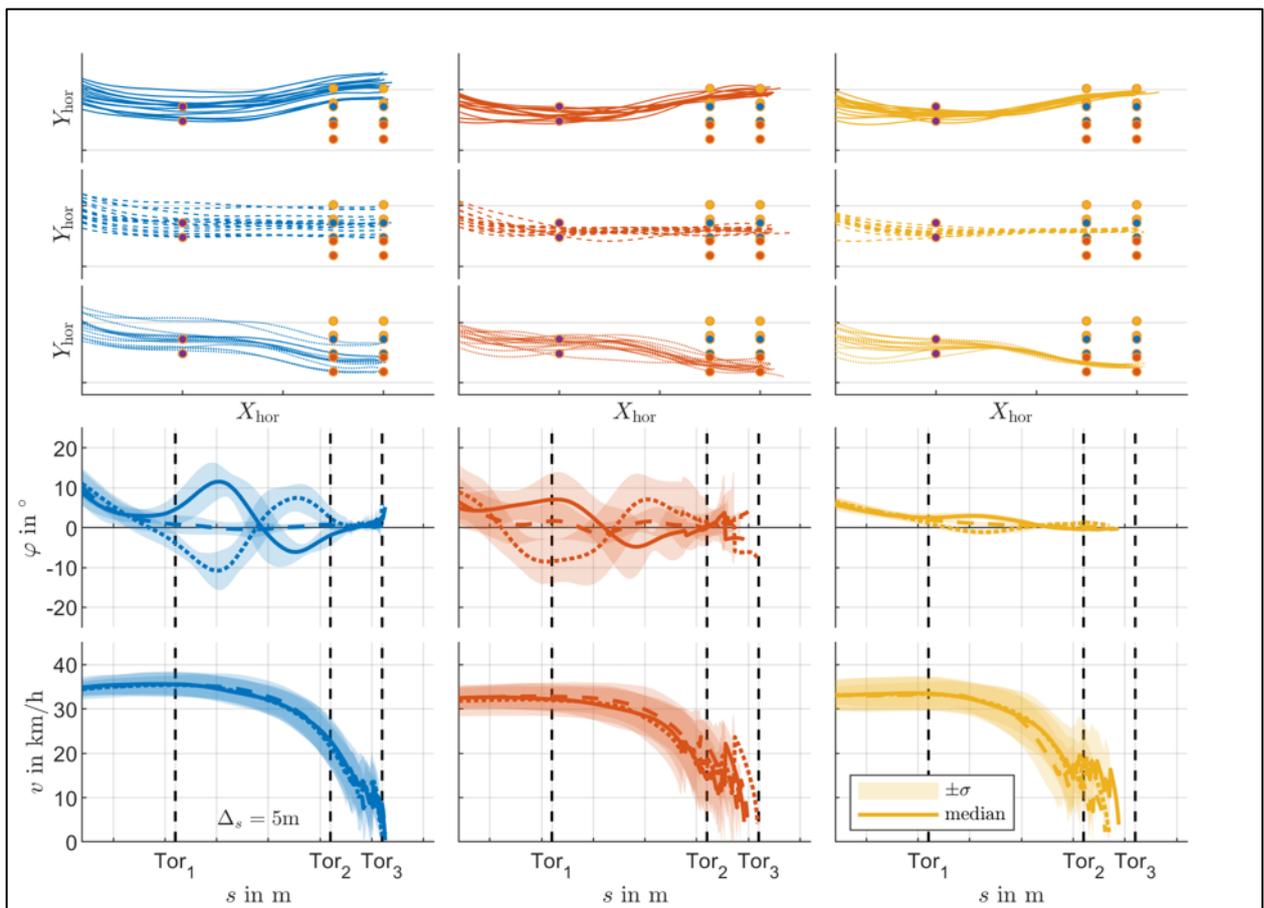


Bild 5-9: Darstellung der gefahrenen Trajektorie für die Aufgabe Ausweichen und Bremsen, getrennt nach Umgebung (v.l.n.r.: Realfahrt, dynamische Simulation, statische Simulation) und Ausweichrichtung (v.o.n.u.: links, geradeaus, rechts). Darunter die über das Probandenpanel gemittelten Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung.

Um statistisch auswertbare, einheitliche Kennwerte zu erzeugen, welche einen Vergleich der verschiedenen Trajektorien in Realfahrt und Simulation ermöglichen, wird das vorgegebene Manöver innerhalb des durch die Pylonen abgesteckten Bereiches durch einen entsprechend parametrisierten Tangens hyperbolicus angenähert. Dieser wird über

- die Amplitude des Querversatzes  $\Delta y$ ,
- die Steilheit  $1/k_y$  und
- den Längsversatz  $x_0$

bestimmt:

$$y_{fit} = \frac{\Delta y}{2} \left( 1 + \tanh \frac{x - x_0}{k_y} \right)$$

Im linken Subplot von Bild 5-10 wird ein exemplarischer Trajektorienverlauf (blaue Kurve) mit dem dazugehörigen Fit (grüne Kurve) dargestellt. Die Ordinate ist auf den Soll-Querversatz (Abstand des seitlich versetzten Tores zur Nulllinie) normiert, um Verzerrungen durch GPS-Ungenauigkeiten und unterschiedliche Untersuchungsumgebung zu vermeiden. Somit bedeuten 100% des Skalenwertes, dass der erzielte Querversatz des Probanden genau den Abstand vom Gassenzentrum des mittleren Tores zum äußeren Gassenzentrum beträgt. Für jedes Ausweichmanöver (die Fahrten durch die mittlere Gasse werden hier nicht dargestellt) ergibt sich somit ein Kennwertsatz aus den drei oben genannten Werten: a), b) und c).

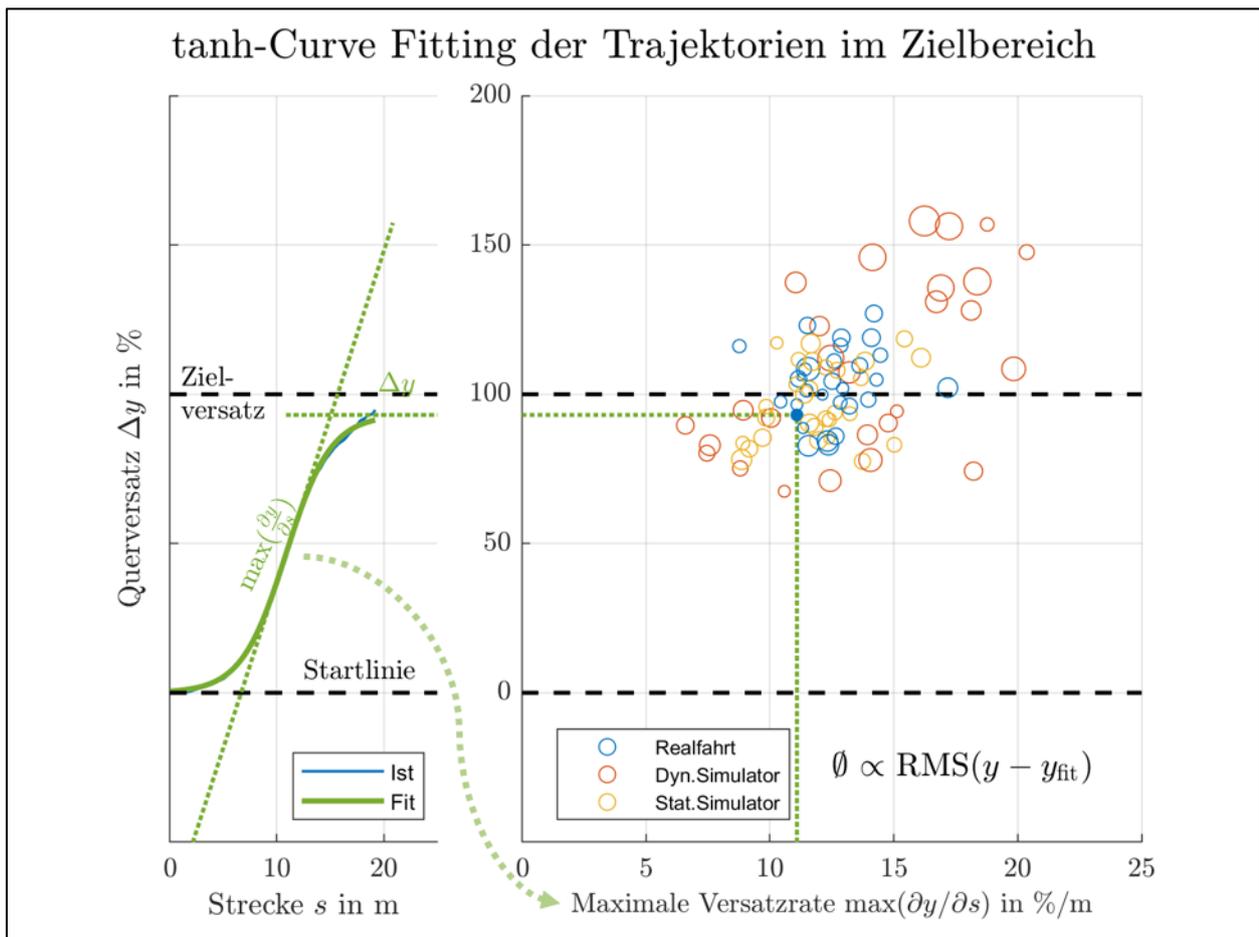


Bild 5-10: tanh-Curve Fitting des Ausweich- und Bremsmanövers anhand einer Beispielfahrt (links) und über alle Fahrer und Versuchsbedingungen (rechts).

Zur Beurteilung der Güte des Curve Fittings wird zudem als Fehlermaß der RMS der Differenz von Mess- und Schätzgröße berechnet.

$$\epsilon = RMS(y_{mess} - y_{fit})$$

Im rechten Subplot wird mit farblich kodierter Umgebung der erreichte normierte Querversatz über die normierte maximale Versatzrate („Steilheit“ der angepassten Kurve) dargestellt. Eine Darstellung des Längsversatzes findet zunächst nicht statt.

Aus dem links dargestellten exemplarischen Kurvenverlauf ergibt sich somit ein einzelner Punkt im rechten Diagramm, welcher hier hervorgehoben und durch die grünen Linien gekennzeichnet wird. Zur Bewertung der Fitting-Güte eines jeden Punktes ist dessen Durchmesser proportional zum RMS-Wert gewählt. Große Durchmesser sprechen somit für starke Abweichungen zum qualitativen Verlauf der *tanh*-Funktion.

Insgesamt zeigt sich die Verteilung der Brems- und Ausweichvorgänge in der Realfahrt homogener, als es in den beiden anderen Umgebungen der Fall ist. Die Punkte verteilen sich hinsichtlich des erzielten Querversatzes gleichmäßig um die 100%-Markierung. Ebenso befindet sich ein Großteil der Ausweichvorgänge hinsichtlich der maximalen Versatzrate in einem schmalen Bereich. In beiden Simulationsumgebungen kommt es zu stärkeren Streuungen bzgl. des Querversatzes und der maximalen Versatzrate, was in der dynamischen Simulation deutlich stärker ausgeprägt ist als in der statischen Simulation. Außerdem zeigen die beiden Simulationsumgebungen häufiger größere Beträge des RMS-Wertes, was für weniger prototypische Ausweichvorgänge spricht.

Wird dieselbe Kurvenanpassung für das reine Ausweichmanöver betrachtet (Der Verlauf wird dann nicht durch Tor 1 und den Stillstand begrenzt, sondern durch Tor 1 und Tor 3), ergibt sich das nachfolgend dargestellte Bild (Bild 5-11).

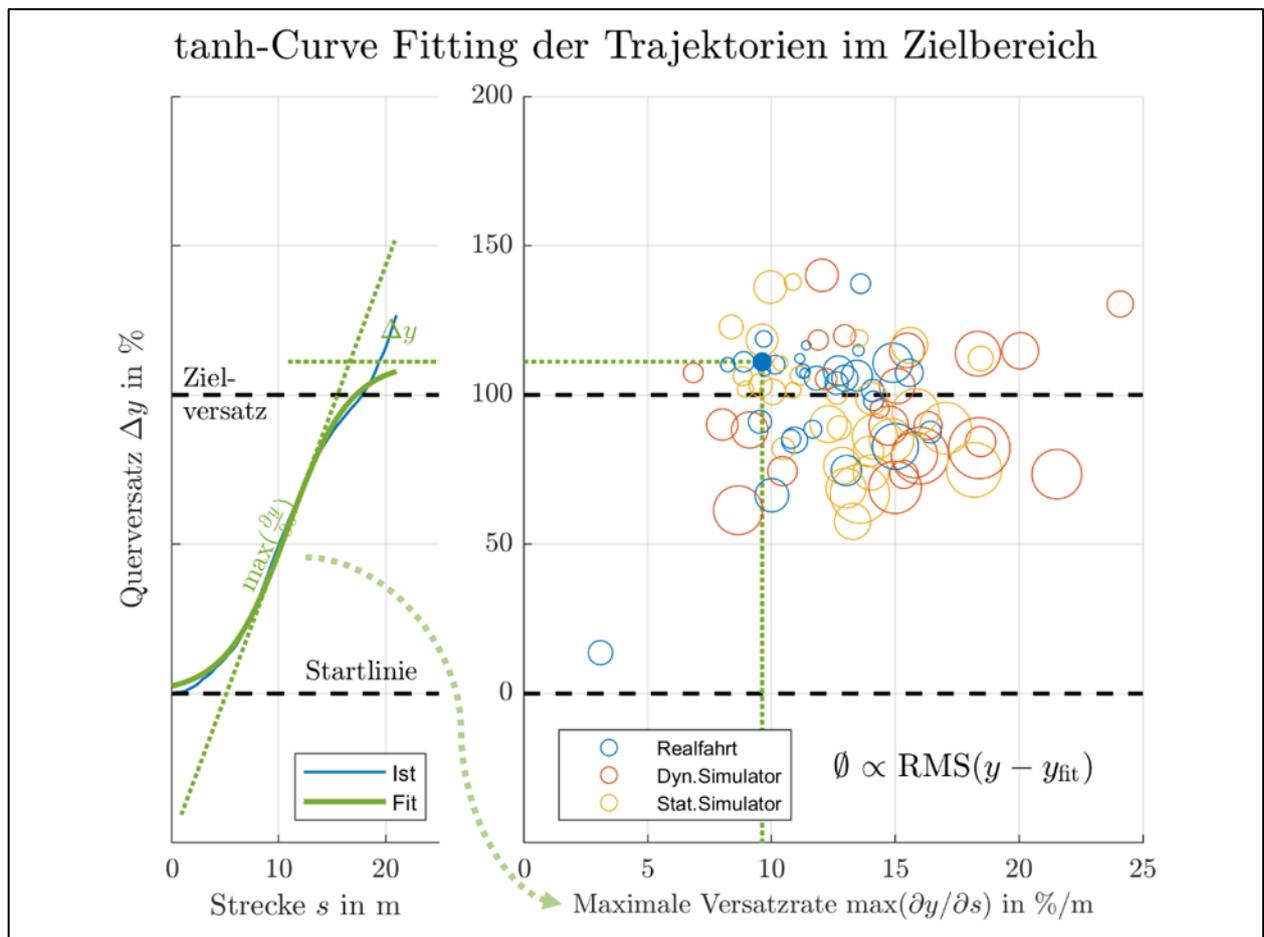


Bild 5-11: tanh-Curve Fitting des Ausweichmanövers anhand einer Beispielfahrt (links) und über alle Fahrer und Versuchsbedingungen (rechts).

Erneut ist die Punktwolke, welche sich in der Realfahrt ergibt diejenige mit den geringsten Streuungen und Abweichungen zum prototypischen *tanh*-Verlauf. Die beiden Simulationsumgebungen zeigen indes deutlich größere RMS-Werte als zuvor. Dies kann einerseits in der Manöverausfahrt hinter Tor 3 begründet liegen, wo trajektorienbedingte Abweichungen zum *tanh*-Verlauf auftreten. Zum anderen kann eine erhöhte Kontrollierbarkeitsbeanspruchung ausschlaggebend sein, wenn der Proband – statt in den Stillstand zu bremsen – mehrere eng aufeinander folgende Richtungswechsel ausführen möchte. Dieses schlechtere beschneiden in der Fahraufgabe ist dabei auch am statischen Simulator zu beobachten und deutet darauf hin, dass dieser zwar in einfachen Fahraufgaben korrekt bedient werden kann, jedoch ebenso wie der dynamische Simulator durch schnelle Richtungsänderungen auf kurzen Distanzen an die Grenze der Kontrollierbarkeit gebracht wird.

Auch in der subjektiven Bewertung der Fahrkompetenz, zeigt sich für beide Fahraufgaben das gleiche Muster (Bild 5-12). Während die Bewertungen für die Realfahrt und den dynamischen Simulator auf dem gleichen Niveau liegen, zeigt sich eine etwas schlechtere Bewertung in der statischen Simulation (nachgestellter Scheffé-Test: alle  $p < .05$ ). Dieser Unterschied äußert sich für das Manöver „Ausweichen“ in einem signifikanten Haupteffekt der Umgebung ( $F(2,28) = 5.99, p < .01, \eta^2 = 0.30$ ). Auch der Interaktionseffekt aus Umgebung und Fahrtrichtung (nicht im Bild) zeigt einen signifikanten Effekt ( $F(4, 56) = 5.18, p < .01, \eta^2 = 0.27$ ). Der nachgestellte Scheffé-Test zeigt jedoch keine systematischen Unterschiede. Für das Manöver „Ausweichen und Bremsen“ zeigt sich kein signifikanter Haupteffekt der Versuchsumgebung ( $F(2,26) = 1.34, p = .279, \eta^2 = 0.09$ ). Wie bereits in der Ausweichbedingung ohne Bremsung zeigt sich ein signifikanter Interaktionseffekt ( $F(4,52) = 3.75, p < .01, \eta^2 = 0.22$ ). Dieser lässt sich auf einzelne signifikante Abweichungen in der statischen Simulation zurückführen, die sich auch im Gesamtmittelwert niederschlagen.

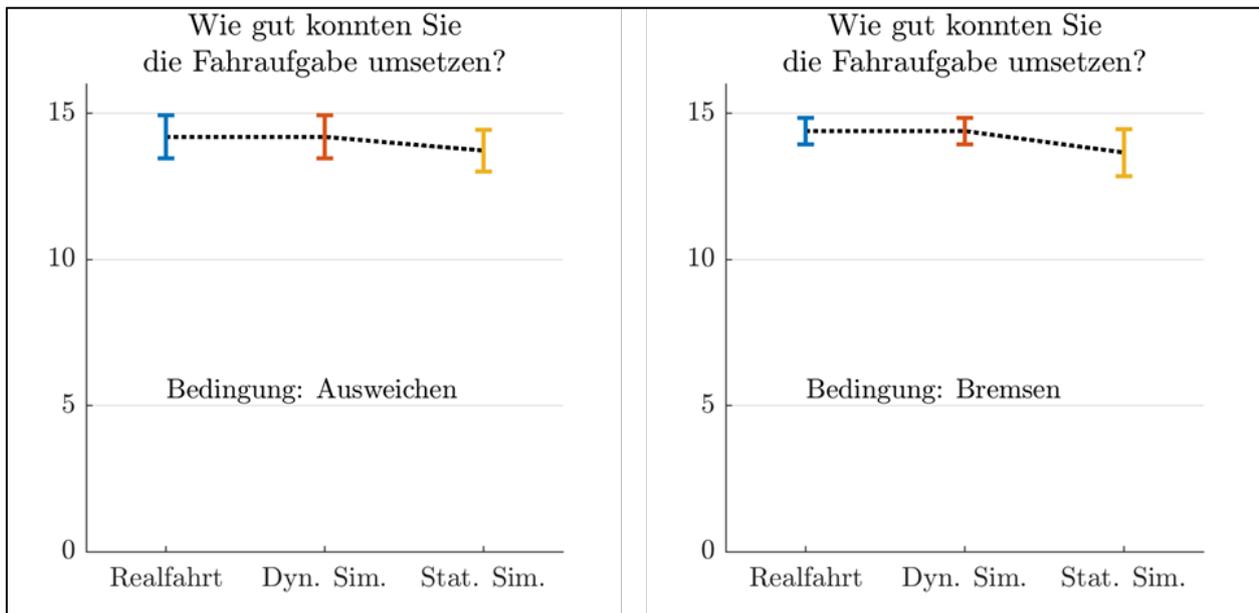


Bild 5-12: Mittlere Bewertung der Aufgabenerfüllung für die Aufgabe Ausweichen (links) und die Aufgabe Ausweichen und Bremsen (rechts).

### Zusammenfassung der Ergebnisse des Ausweichens / Ausweichens- und Bremsens

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Ergebnisse der Ausweichaufgabe Folgendes festgehalten:

<b>AuB1</b>	Der dynamische Simulator zeigt sich den Erwartungen aus der Verifikationsstudie entsprechend als deutlich instabiler, die statische Simulation abermals als deutlich stabiler im Vergleich zur Realfahrt.
<b>AuB2</b>	Insgesamt entsprechen die Trajektorienverläufe in der statischen Simulation den Verläufen aus der Realfahrt besser. Dies gilt jedoch nur für das Manöver Ausweichen und Bremsen und nicht für das Ausweichen mit Fortsetzung der Fahrt. Die dynamische Simulation zeigt insgesamt größere Abweichung und vereinzelte extreme Ausreißer, die einen Kontrollverlust über das System darstellen. Die statische Simulation zeigt derartige Ausreißer lediglich bei einem Ausweichen mit Fortsetzung der Fahrt.
<b>AuB3</b>	Trotz der besseren Übereinstimmung in den Trajektorien wird die eigene Fahrkompetenz in der statischen Simulation niedriger bewertet, während die dynamische Simulation auf dem gleichen Niveau liegt, wie es in der Realfahrt der Fall ist.

### 5.2.2 Nebenaufgabe

Betrachtet man für die Bedienung des RSVP zunächst die Erfolgsrate für die Standbedingung, zeigt sich für den Anteil korrekter Reaktionen ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsumgebungen ( $F(2,28) = 8.60, p < .01, \eta^2 = 0.38$ ). Ein nachgestellter Scheffé-Test zeigt signifikant geringere Trefferraten für die Realfahrt als für die beiden anderen Versuchsumgebungen (Bild 5-13). Auch für die Fahrtbedingung zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Umgebung auf den Anteil der korrekten Reaktionen ( $F(2,28) = 18.51, p < .001, \eta^2 = 0.57$ ). Der Haupteffekt für die Fahrtrichtung zeigt einen tendenziellen Unterschied ( $F(1,14) = 4.04, p = .064, \eta^2 = 0.22$ ). Der Interaktionseffekt der Versuchsumgebung und der Fahrtrichtung ergibt keinen statistisch signifikanten Unterschied ( $F(2,28) = 2.31, p = .112, \eta^2 = 0.14$ ). Hierbei lässt sich ein geringerer Anteil korrekt beantworteter Zielreize in der Realfahrt erkennen (Bild 5-13). Der nachgestellte Scheffé-Test zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen der Realfahrt und den anderen beiden Versuchsbedingungen. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in den unterschiedlichen Lichtverhältnissen in der Simulation und der Realfahrt, die trotz einer Antireflexionsfolie und einer displayseitigen Streulichtblende zu einer schlechteren Lesbarkeit des Displays führen. Hierbei muss jedoch angemerkt werden, dass es sich bei dem verwendeten Versuchsaufbau in allen Umgebungen um ein Display aus dem Consumer-Bereich handelte, welches bezüglich seiner Leuchtstärke für den Innenbereich ausgelegt ist. Displays, die für moderne Motorrad-HMIs verwendet werden, sind für die Lichtverhältnisse im Außenbereich konzipiert, sodass die Untersuchbarkeit von Motorrad-HMIs mit entsprechender Technik am Realfahrzeug nicht eingeschränkt ist, was die vorliegenden Ergebnisse suggerieren könnten.

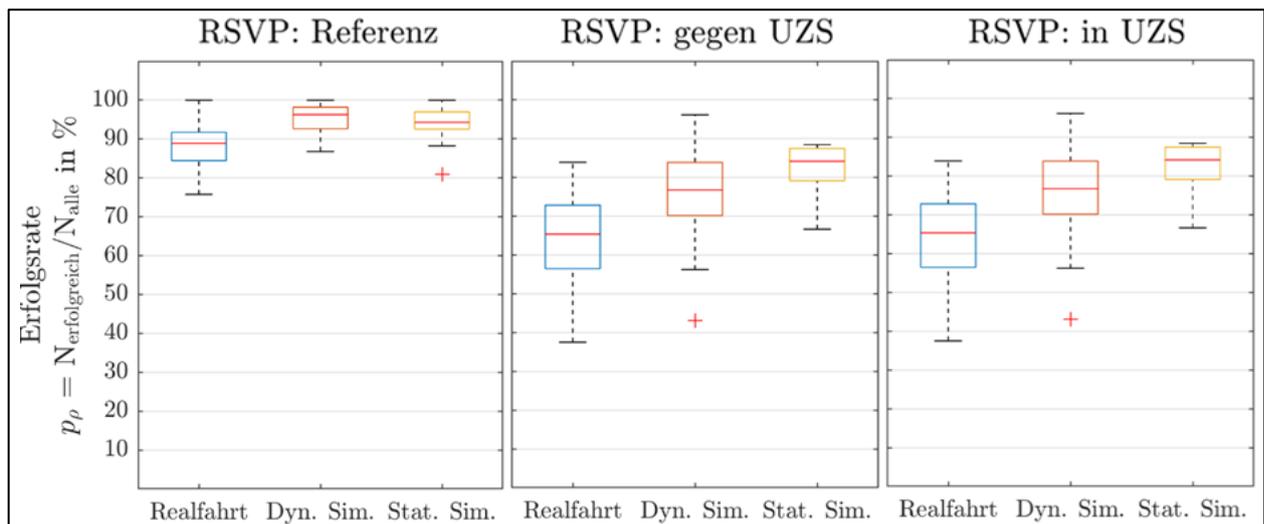


Bild 5-13: Boxplot der Erfolgsrate bei der Reaktion auf den RSVP getrennt nach den Versuchsumgebungen.

Betrachtet man die Reaktionszeit auf den RSVP im Stand (Bild 5-14), zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsumgebungen ( $F(2,28) = 10.41, p < .001, \eta^2 = 0.43$ ). Wie bereits beim Anteil korrekter Reaktionen, zeigt auch hier der nachgestellte Scheffé-Test einen signifikanten Unterschied zwischen der Realfahrt und den beiden anderen Bedingungen (alle  $p < .01$ ). Folglich reagieren die Fahrer in der Standbedingung auf dem Realfahrzeug langsamer, als in den beiden Simulationsumgebungen, was ebenfalls ein Resultat der oben genannten Lichtverhältnisse sein kann. Bezüglich der Reaktionszeit auf den RSVP während der Fahrt zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt der Umgebung ( $F(2,28) = 11.54, p < .01, \eta^2 = 0.45$ ). Ein nachgestellter Scheffé-Test zeigt einen signifikanten Unterschied der dynamischen Simulation zur Realfahrt in beide Fahrrichtungen und zur statischen Simulation in der Fahrtrichtung gegen den Uhrzeigersinn (alle  $p < .05$ ). Dies bedeutet, dass die Reaktionszeiten in der hier gezeigten Versuchsreihe am dynamischen Simulator schneller sind, als in den anderen Umgebungen. Der Haupteffekt der Fahrtrichtung zeigt einen tendenziellen Unterschied ( $F(1,14) = 3.89, p = .069, \eta^2 = 0.22$ ) und der Interaktionseffekt aus Umgebung und Fahrtrichtung zeigt keinen statistisch bedeutsamen Unterschied ( $F(2,28) = 2.09, p = .142, \eta^2 = 0.13$ ). Ein nachgestellter Scheffé-Test zeigt, dass in der dynamischen Simulation für beide Fahrrichtungen im Vergleich zur Realfahrt und für die Fahrtrichtung im Uhrzeigersinn der dynamischen Simulation im Vergleich zur statischen Simulation in beide Fahrrichtungen signifikante Unterschiede erzielt werden (alle  $p < .01$ ).

Vergleicht man die Veränderung der Reaktionszeit zwischen Stand und Fahrt, zeigt sich eine Verlangsamung der Reaktion während der Fahrt nur in der statischen Simulation, jedoch nicht in der Realfahrt und nicht in der dynamischen Simulation. Dieses Ergebnis widerspricht den Beobachtungen, die in der Verifikationsstudie hinsichtlich der Beanspruchung gemacht wurden, da hieraus erwartet wurde, dass eine bessere Übereinstimmung zwischen Realfahrt und statischer Simulation besteht.

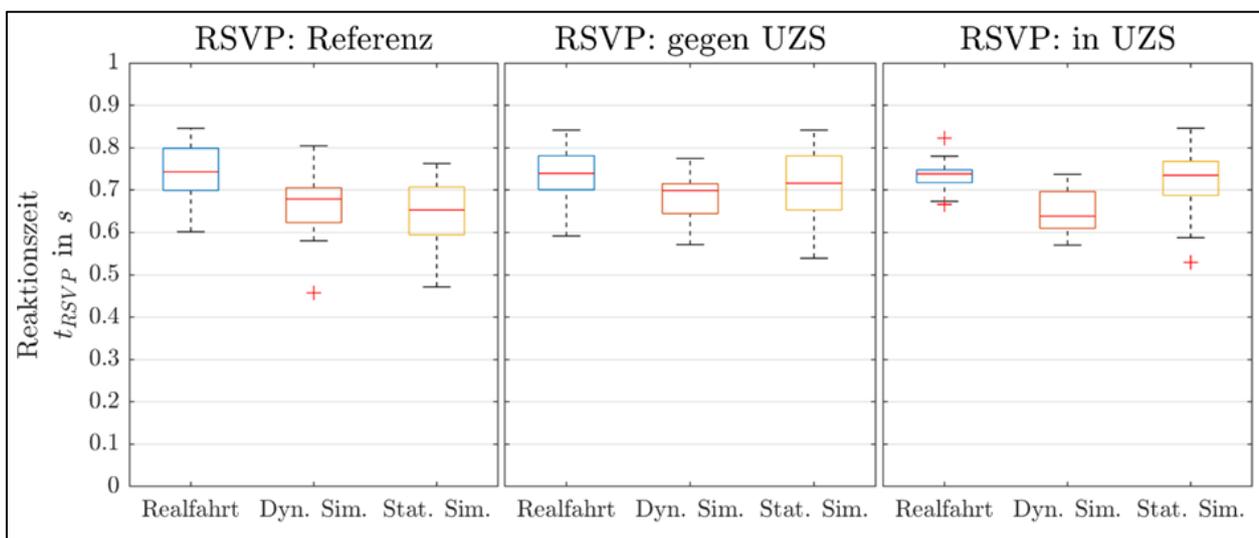


Bild 5-14: Boxplot der Reaktionszeit auf den RSVP. Dargestellt werden die Bedienung während der Fahrt (links), die Bedienung während der Fahrt gegen den Uhrzeigersinn (Mitte) und die Bedienung während der Fahrt im Uhrzeigersinn (rechts), getrennt nach den Versuchsumgebungen.

Für die Bearbeitung des RSVP wurden die Probanden nach der erlebten Beanspruchung durch den RSVP und bezüglich der Erfüllung der Fahraufgabe befragt. Die Befragung erfolgt getrennt für die Fahrrichtungen im und gegen den Uhrzeigersinn außerdem wurde die Frage nach der Beanspruchung durch die Nebenaufgabe auch für die Standbedingung durchgeführt. Für die Bedienung des RSVP im Stand zeigt sich kein Haupteffekt der erlebten Beanspruchung ( $F(2,28) < 1$ ). Für die erlebte Beanspruchung durch die Bedienung des RSVP während der Fahrt zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Fahrtrichtung ( $F(1,12) = 13.75, p < .05, \eta^2 = 0.53$ ). Demnach wird der RSVP in Fahrten im Uhrzeigersinn als beanspruchender wahrgenommen. Eine Ursache hierfür kann der Pylonenaufbau des Ausweich- und Bremsmanövers sein, der sich bei Fahrten mit dem Uhrzeigersinn näher am Kurvenausgang befindet und somit eine leichte Anpassung

im Fahrverhalten erfordert. Für die Umgebung zeigt sich kein signifikanter Haupteffekt ( $F(2,24) < 1$ ). Der Interaktionseffekt zeigt keinen signifikanten Unterschied ( $F(2,24) = 2.29, p = .123, \eta^2 = 0.16$ ).

Im Falle der subjektiv erlebten Erfüllung der Fahraufgabe zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Umgebung ( $F(2,24) = 3.42, p < .05, \eta^2 = 0.22$ ). Tendenziell scheinen die Fahrer die Fahraufgabe in der statischen Simulation als besser erfüllt zu erleben, was sich jedoch statistisch in einem nachgestellten Scheffé-Test nicht nachweisen lässt. Der Haupteffekt der Richtung weist einen tendenziellen Unterschied auf ( $F(1,12) = 4.33, p = .059, \eta^2 = 0.27$ ). Interessanterweise zeigt sich diese Tendenz nur in der dynamischen Simulation, nicht aber in der Realfahrt und der statischen Simulation. Der Interaktionseffekt von Umgebung und Fahrtrichtung wird für die erlebte Erfüllung der Fahraufgabe nicht signifikant ( $F(2,24) = 1.32, p = .290, \eta^2 = 0.10$ ). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fahraufgabenerfüllung in den Umgebungen unterschiedlich bewertet wird.

Abschließend wird für die RSVP-Fahrt die Änderung der mittleren Geschwindigkeit durch die Bedienung des RSVP betrachtet. Hierfür wurden Segmente mit einer Länge von 500m vor und während der RSVP Bedienung extrahiert (Bild 5-15). Hierfür zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Umgebung ( $F(2,28) = 5.31, p < .05, \eta^2 = 0.28$ ). Weder der Haupteffekt der Fahrtrichtung noch der Interaktionseffekt zeigen einen signifikanten Unterschied. Der nachgestellte Scheffé-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede, deutet jedoch eine bessere Übereinstimmung zwischen Realfahrt und statischer Simulation an. Es bleibt dennoch anzumerken, dass die Absolutwerte der Geschwindigkeitsdeltas sehr gering sind. Weiterhin bleibt anzumerken, dass sich in beiden Simulationsumgebungen größere Streuungen der Geschwindigkeit zeigen als die Realfahrt, was in der statischen Simulation stärker ausgeprägt ist als in der dynamischen Simulation. Hinsichtlich der größeren beobachteten Streuung zeigt sich abermals ein Indiz für die Additivität der Minimalszenarien, da bereits in der Verifikationsstudie größere Schwankungen der Geschwindigkeit in den Simulationsumgebungen auftraten. Auch das Verhältnis der Streuung zwischen dynamischer und statischer Simulation entspricht dabei den Beobachtungen aus der Verifikationsstudie.

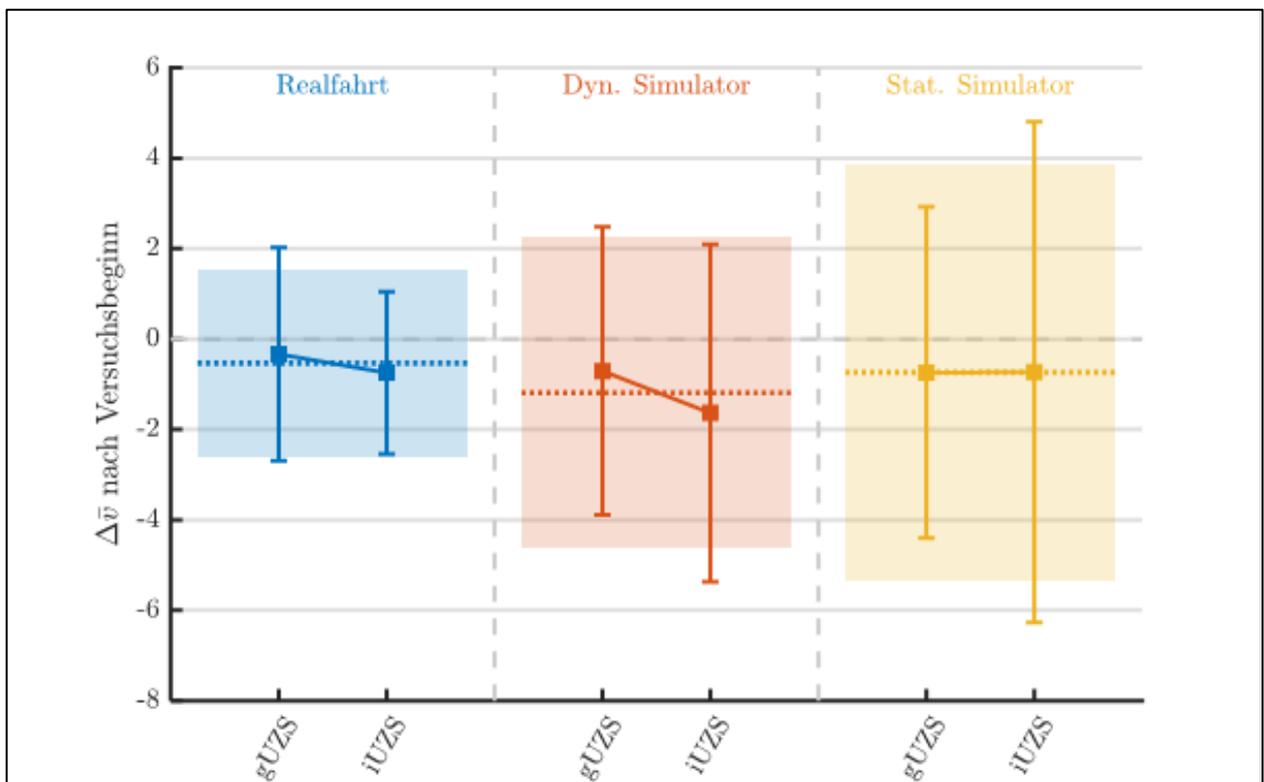


Bild 5-15: Mittlere Geschwindigkeitsänderung nach Beginn der Nebenaufgabenbedienung, getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung. Die punktierten Linien und transparenten Balken zeigen Mediane respektive Standardabweichungen der gesamten Stichprobe je Umgebung, unabhängig von der Fahrtrichtung.

**Zusammenfassung der Ergebnisse des RSVP**

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Ergebnisse des RSVP Folgendes festgehalten:

<b>RSVP1</b>	In der Realfahrt zeigten sich im Stand und während der Fahrt geringere Anteile korrekter Reaktionen als in den beiden Simulationsumgebungen. Eine mögliche Ursache hierfür können ungünstigere Lichtverhältnisse sein.
<b>RSVP2</b>	In der Realfahrt reagieren die Probanden im Stand langsamer auf den RSVP als in den beiden Simulationsumgebungen. Während der Fahrt entsprechen die Reaktionszeiten zwischen Realfahrt und dynamischer Simulation einander besser als in der statischen Simulation. Eine deutliche Zunahme der Reaktionszeit im Vergleich zwischen Bedienung im Stand und Bedienung während der Fahrt kommt nur in der statischen Simulation zustande.
<b>RSVP3</b>	Die erlebte Beanspruchung durch die Bedienung des RSVP zeigt keinen Effekt für die Umgebungen (weder im Stand, noch während der Fahrt). Die Fahrtrichtung zeigt einen tendenziellen Unterschied, sodass Fahrten im Uhrzeigersinn als beanspruchender erlebt werden. Dies zeigt sich nicht für die statische Simulation.
<b>RSVP4</b>	Die Erfüllung der Fahraufgabe wird in der statischen Simulation als tendenziell besser gewertet. Richtungseffekte scheinen hinsichtlich der Probandeneinschätzung lediglich in der dynamischen Simulation eine Rolle zu spielen.

### 5.2.3 Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr

In Bild 5-16 werden die Rollwinkel über den Fahrtenverlauf aller Fahrer in der Referenzfahrt im (nachgebauten) öffentlichen Straßenverkehr dargestellt. Wie in den bisherigen Betrachtungen des Rollwinkels zeigt sich qualitativ auch hier eine stärkere Überlagerung mit Schwingungen in der dynamischen Simulation als in der Realfahrt, was sich insbesondere während des Abbiegevorgangs deutlich erkennen lässt (ca. 400 bis 600 m auf dem Hinweg bzw. 1400 bis 1600 m auf dem Rückweg). Die Kurvendurchfahrt bei höherer Geschwindigkeit (ca. 1200 bis 1400 m auf dem Hinweg bzw. 600 bis 800 m auf dem Rückweg) zeigt ebenfalls überlagerte Schwingungen, die jedoch geringer ausfallen als beim Abbiegevorgang. Interessanterweise zeigt sich eine bessere Übereinstimmung in der Kurvendurchfahrt auf dem Rückweg im Vergleich zum Hinweg. Die statische Simulation zeigt sich abermals als schwingungsfreies System. Außerdem zeigen sich wie in den bisherigen Betrachtungen deutlich geringere Rollwinkel.

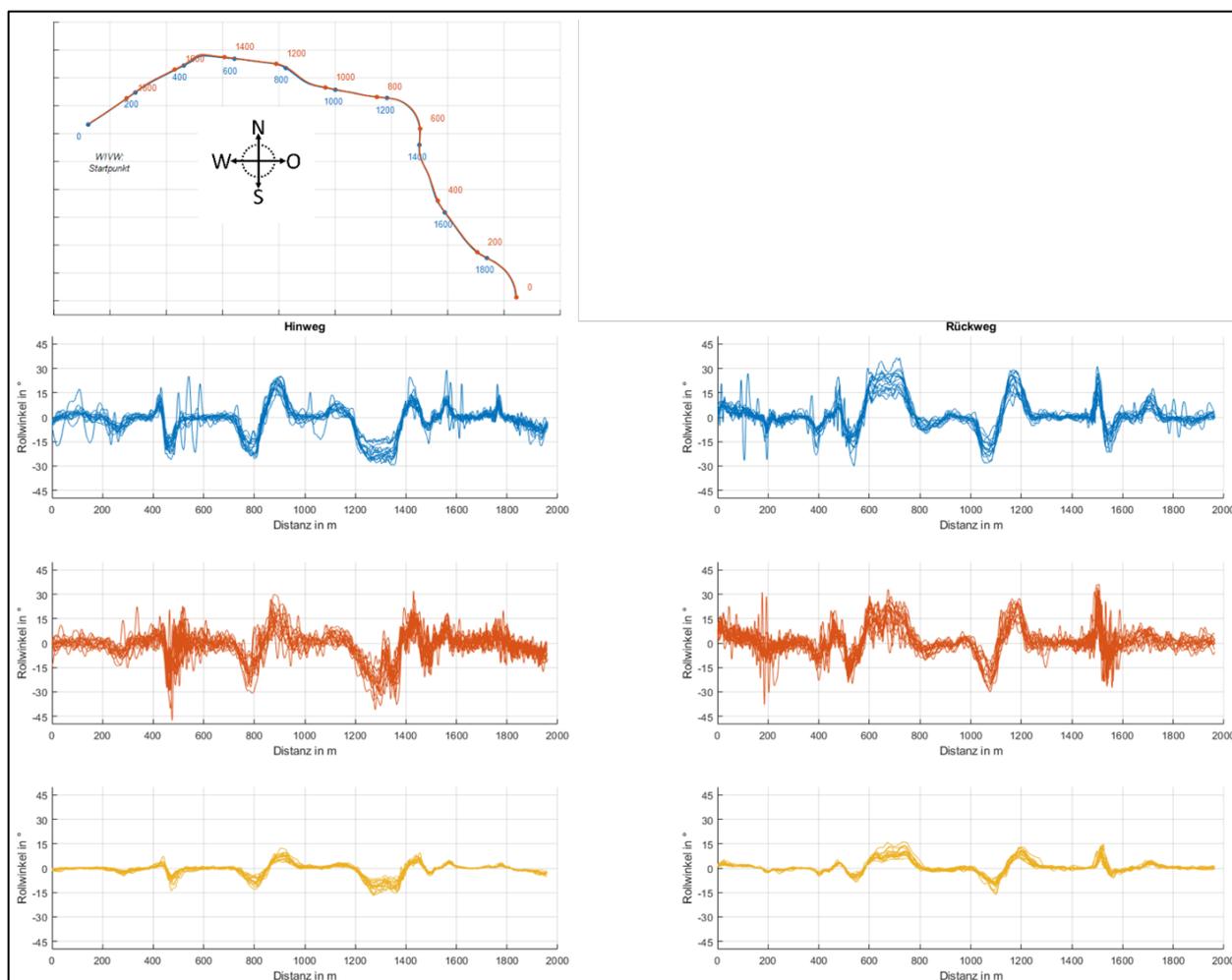


Bild 5-16: Fahrtverläufe der Referenzstrecke. Dargestellt wird eine Draufsicht der Route mit Bemaßung für Hin- und Rückweg, so wie die Fahrtverläufe aller Fahrer getrennt nach Hin- und Rückfahrt (linke, bzw. rechte Spalte) und Umgebung (v.o.n.u.: Realfahrt, dynamische Motorradsimulation, statische Motorradsimulation).

Im Folgenden soll die Kurvendurchfahrt (1200 bis 1400 m auf dem Hinweg bzw. 550 bis 750 m auf dem Rückweg) näher betrachtet werden, da hierüber Aussagen bezüglich der Simulatoren bei Kurvenfahrten in üblichen Landstraßengeschwindigkeiten gezogen werden können, die aus den zuvor vorgestellten Kapiteln nicht ableitbar waren.

Betrachtet man zunächst die mittlere Geschwindigkeit je Versuchsbedingung, zeigt sich eine bessere Übereinstimmung zwischen statischer Simulation und der Realfahrt (Bild 5-17), was sich sowohl für die Fahrt auf dem Hinweg als auch die Fahrt auf dem Rückweg zeigt. Trotz der absoluten Unterschiede in der gewählten Geschwindigkeit zeigt sich auf makroskopischer Ebene ein einheitlicher Verlauf am Kurvenaus-

bzw. Kurveneingang, der mit einem Richtungswechsel einhergeht, und sich auf dem Hinweg im Bereich von 1400 bis 1450 m und auf dem Rückweg im korrespondierenden Bereich von 500 bis 550 m verorten lässt. An dieser Stelle zeigt sich für alle Versuchsumgebungen ein lokales Minimum der Geschwindigkeit, welches gleichzeitig mit der geringsten Standardabweichung einhergeht. In den Kurvendurchfahrtsbereichen außerhalb dieser Stelle zeigt sich in allen Versuchsumgebungen eine zunehmende Standardabweichung der Geschwindigkeit, was eine höhere Variabilität zwischen den Fahrern impliziert. Diese ist in der statischen Simulation tendenziell am geringsten ausgeprägt, gefolgt von der Realfahrt. Die dynamische Simulation zeigt tendenziell die größte Geschwindigkeitsvariabilität.

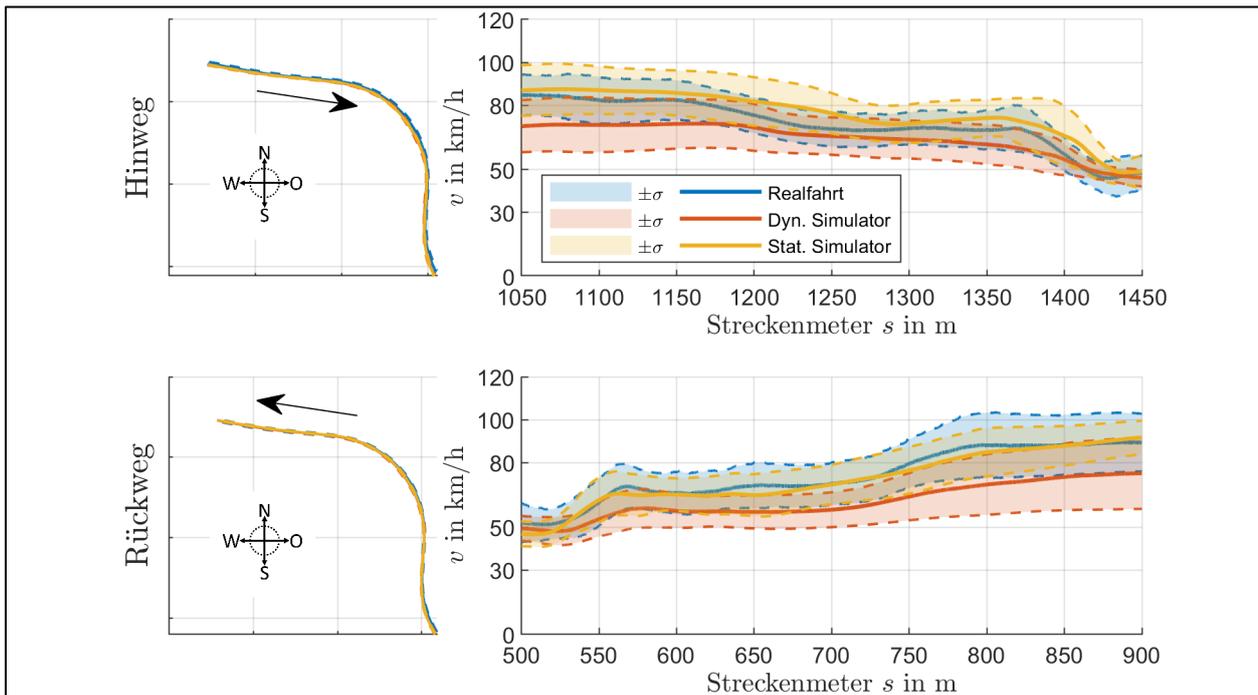


Bild 5-17: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit im Verlauf der Kurve in der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung.

Betrachtet man die Rollwinkelverläufe des entsprechenden Kurvensegments, zeigen sich deutlich geringere Rollwinkel in der statischen Simulation als in den beiden anderen Versuchsumgebungen (Bild 5-18). Auch zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Fahrern, was den Ergebnissen der bisher diskutierten Kurvenfahrten entspricht. In der dynamischen Motorradsimulation zeigen sich im Mittel etwas geringere Rollwinkel als in der Realfahrt. Dies entspricht den Ergebnissen der Geschwindigkeitswahl, da bei geringerer Geschwindigkeit für den gleichen Kurvenradius auch geringere Rollwinkel aufgebracht werden müssen. Sowohl auf dem Hinweg als auch auf dem Rückweg zeigen sich Schwingungen des Rollwinkels, die bereits in Fahrten mit geringeren Geschwindigkeiten aufgetreten sind. Bemerkenswert ist zudem der starke Einbruch des Rollwinkels am dynamischen Fahrsimulator bei etwa 1325 m auf dem Hinweg, sowie bei etwa 650 m auf dem Rückweg. Dieses Charakteristikum ist bei der gesamten Stichprobe zu erkennen und deutet auf einen systematischen statt eines stochastischen Effektes hin. Eine Erklärung könnte in der bereits in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen visuellen Wahrnehmung liegen. So wird ggf. in der realen Umwelt der Streckenverlauf über eine längere Distanz eingesehen, sodass dem Fahrenden ein frühes Urteil über die vorliegende Kurvenkrümmung ermöglicht wird. So kann ein Fahrer etwa antizipieren, dass eine zweigeteilte Rechtskurve mit einem kurzen, geraden Verbindungsstück „in einem Schwung“ befahren werden kann, während bspw. auf dem Sichtsystem des dynamischen Simulators diese Weitsicht nicht gegeben ist und die Fahrenden – trotz geometrischer Übereinstimmung der virtuellen Kurvenverläufe zur Realfahrt – beide Kurvenelemente sequentiell planen und einzeln umsetzen. In der statischen Simulation sollte diese Herausforderung nicht bestehen, da eine höhere Auflösung des Bildes vorliegt.

Obgleich die Erwartungen aus der Realfahrt, bezüglich der höheren Stabilität des dynamischen Motorradsimulators bei Landstraßengeschwindigkeiten nicht erfüllt haben, zeigen sich für alle Versuchsumgebungen die Charakteristika, die sich bereits in den anderen Minimalszenarienkombinationen zeigten.

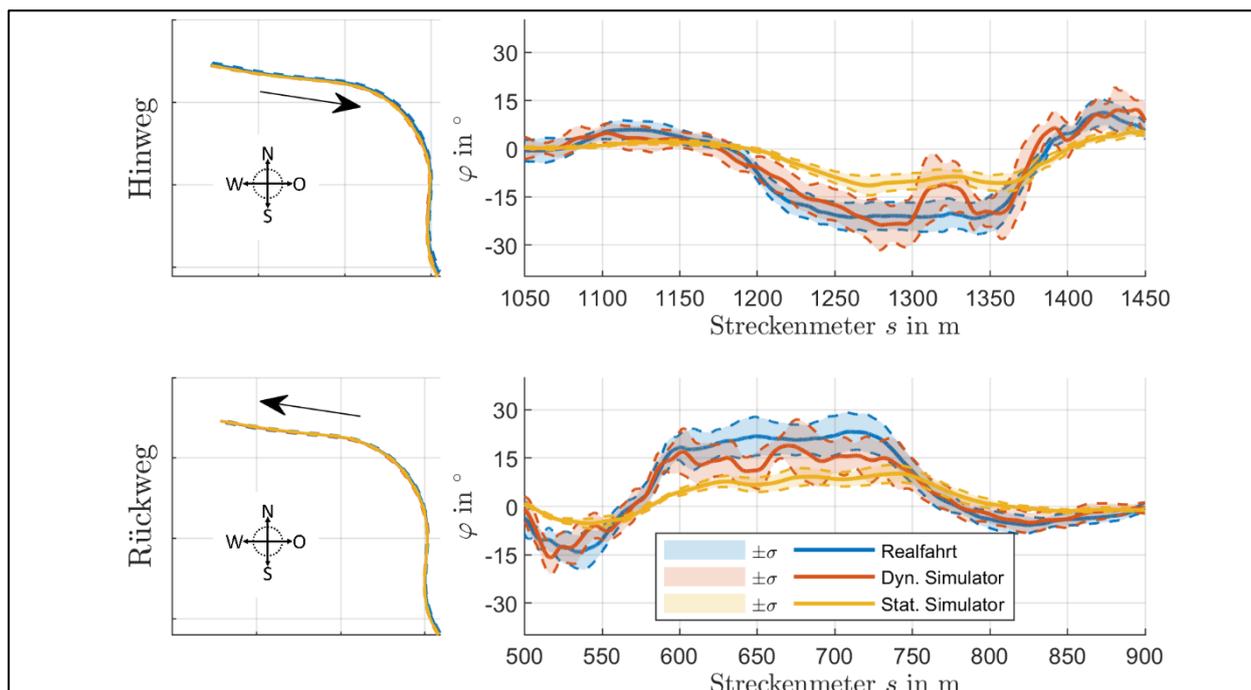


Bild 5-18: Mittelwert und Standardabweichung des Rollwinkels im Verlauf der Kurve in der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung.

### Zusammenfassung der Ergebnisse der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Ergebnisse der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr Folgendes festgehalten:

<p><b>öStV1</b></p>	<p>Für Abbiegevorgänge konnten die gleichen Muster beobachtet werden, die sich bereits in Kurvenfahrten mit geringeren Geschwindigkeiten (Bereich 40- 60 km/h) gezeigt hatten: Die dynamische Simulation zeigt sich deutlich instabiler, die statische Simulation deutlich stabiler, als das Realfahrzeug.</p>
<p><b>öStV2</b></p>	<p>Bei der Kurvenfahrt ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (100 km/h) zeigt sich eine bessere Übereinstimmung der Geschwindigkeitswahl zwischen statischer Simulation und Realfahrt.</p>
<p><b>öStV3</b></p>	<p>Die hergestellten Rollwinkel bei der Kurvenfahrt ohne Geschwindigkeitsbeschränkung entsprechen in der Realfahrt und der dynamischen Simulation den Erwartungen, die sich aus der Betrachtung der Geschwindigkeitsverläufe ergab. In der statischen Simulation lagen die Rollwinkel wie in den bisherigen Betrachtungen deutlich niedriger, was auf das Fahrdynamikmodell zurückzuführen ist.</p>
<p><b>öStV4</b></p>	<p>Wie in den vorherigen Betrachtungen zeigen sich deutliche Schwankungen des Rollwinkels in der dynamischen Simulation.</p>

### 5.2.4 Nachbefragung - Probandenstudie

Im Rahmen der Nachbefragung wurden die Probanden befragt, wie realistisch sie den Gesamteindruck des jeweiligen Simulators bewerten. Beide Simulatoren werden diesbezüglich ähnlich wahrgenommen und auf der dargebotenen Skala im Bereich „mittel“ bewertet ( $t(14) = 0.80, p = .436$ ; Bild 5-19 links). Der Gesamteindruck des Lenkverhaltens wird für den statischen Simulator im Bereich „wenig“ bewertet (Bild 5-19, 2. von links). Die Bewertungen für den dynamischen Simulator bewegen sich im Bereich von „wenig“ bis „mittel“ ( $t(14) = 1.74, p = .104$ ). Auf die Frage nach der Realitätstreue der Kräfte an der Lenkung gaben die Fahrer für den statischen Simulator Beurteilungen im Bereich „wenig“ ab (Bild 5-19, 3. von links). Für den dynamischen Motorrad Simulator liegen die Beurteilungen signifikant höher im Bereich „mittel“ ( $t(14) = 2.91, p = .001, d = 0.75$ ). Auf die Frage wie gut es den Probanden gelingt, mit den Simulatoren der Fahrspur zu folgen, zeigt sich eine signifikant bessere Bewertung zugunsten des statischen Simulators (Bild 5-19 rechts). Während der statische Simulator im Bereich „gut“ bewertet wird, wird der dynamische Simulator als „mittel“ bewertet ( $t(14) = -4.28, p < .001, d = -1.10$ ). Hierbei muss jedoch relativiert werden, dass ein einfacheres Folgen der Fahrspur nicht zwingend bedeutet, dass dies auf realistische Weise erfolgt. Ein Widerspruch zu den vorherigen Ergebnissen liegt somit nicht zwingenderweise vor.

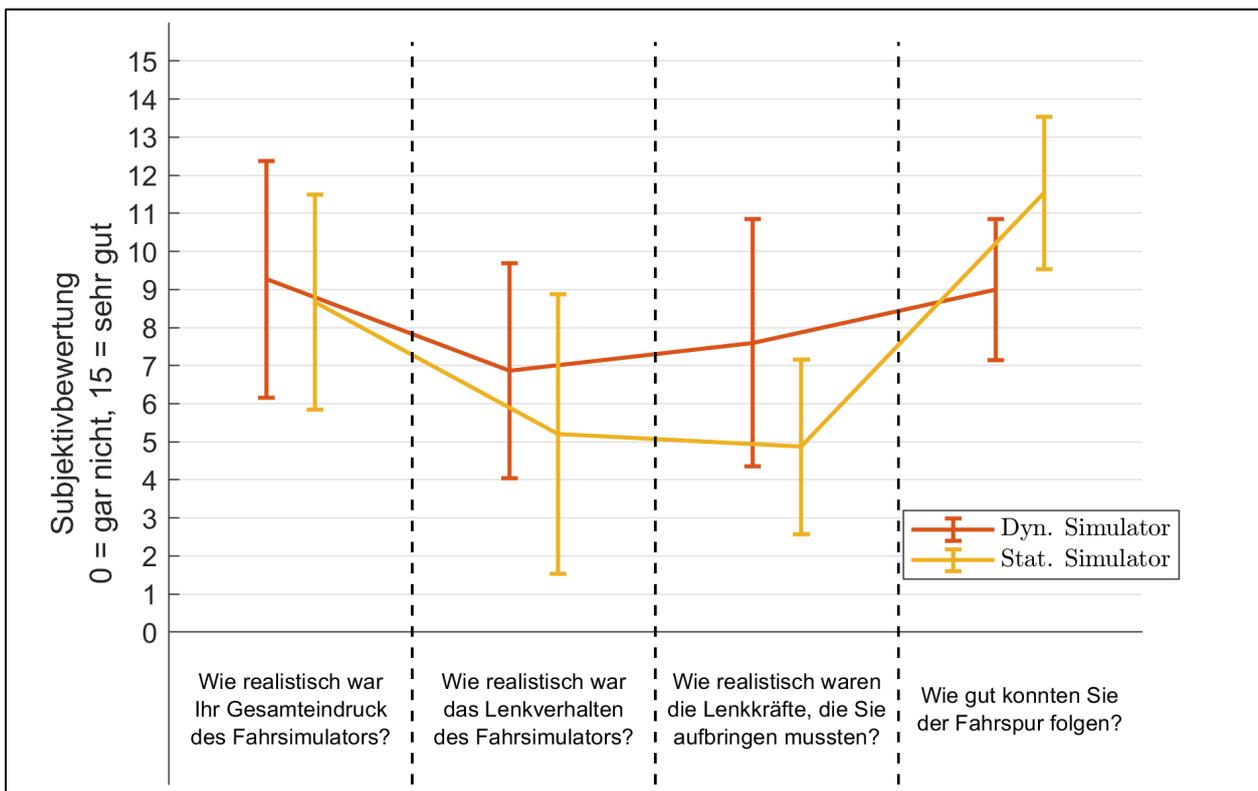


Bild 5-19: Mittlere Bewertung der Items „Wie realistisch war Ihr Gesamteindruck des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch war das Lenkverhalten des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch waren die Kräfte, die Sie zum Lenken aufbringen mussten?“ und „Wie gut konnten Sie der Fahrspur folgen?“, aufgeteilt nach den Simulatorenausbaustufen statisch und dynamisch.

Ein weiterer Teil der Nachbefragung beschäftigte sich mit dem Fahrerlebnis in der virtuellen Welt. Hierbei zeigen sich für die einzelnen Befragungsisems „Wie natürlich erschien ihnen die Interaktion mit der Umgebung?“ ( $t(14) = -0.64, p = .531$ ; Bild 5-20 links), „Wie stark stimmte ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein“ ( $t(13) = 0.29, p = .775$ ;<sup>8</sup> Bild 5-20, 2. von links) und „Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?“ ( $t(14) = 0.84, p = .413$ ; Bild 5-20, 3. von links) keine Unterschiede zwischen den beiden Simulationsumgebungen. Lediglich das Item „Wie gut konnten Sie das Motorrad in der virtuellen Welt bewegen oder manipulieren?“

<sup>8</sup> Die Abweichung des angegebenen Freiheitsgrades kommt durch eine fehlende Bewertung eines Fahrers zustande.

( $t(13) = 2.10, p = .055, d = 0.56$ ) zeigt eine tendenziell bessere Beurteilung zu Gunsten des statischen Motorradsimulators (Bild 5-20 rechts).

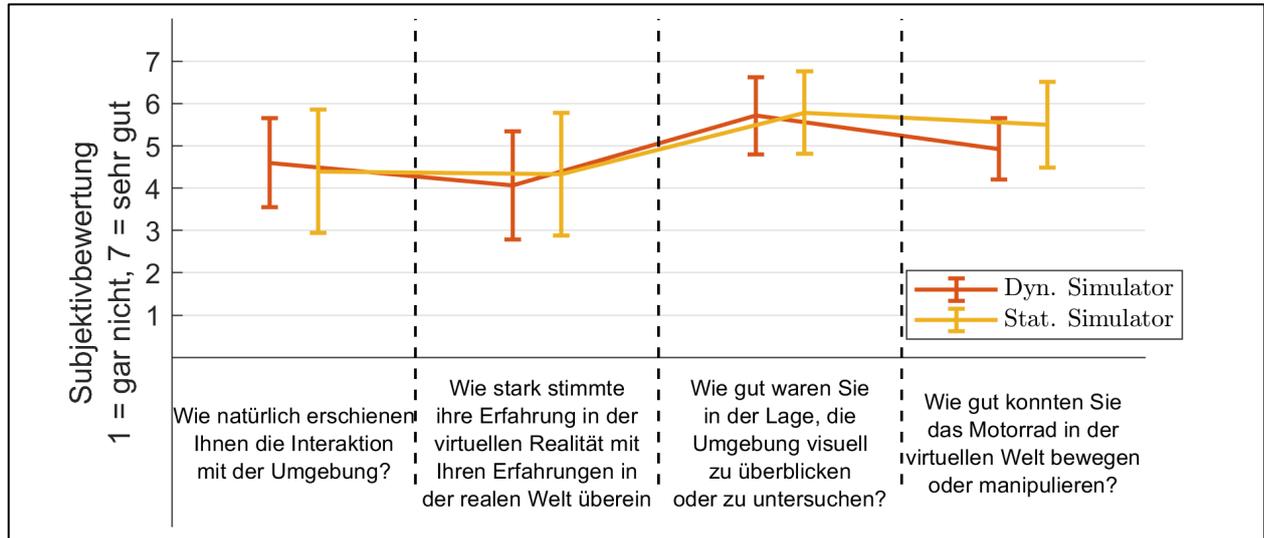


Bild 5-20: Mittlere Bewertung für die Fragen: „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?“, „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“, „Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?“ und „Wie gut konnten Sie das Motorrad in der virtuellen Realität bewegen oder manipulieren?“, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.

Analog zur Verifikationsstudie wurde auch im Rahmen der Probandenstudie die Befragung zur erlebten Präsenz durchgeführt. Tendenzuell zeigt sich dabei wie in der Verifikationsstudie ein etwas ausgeprägteres Präsenzerleben in der dynamischen Motorradsimulation als in der statischen Motorradsimulation (Bild 5-21). Ein signifikanter Unterschied zeigt sich jedoch nur im Falle des Items „Während der Simulation war die durch sie erschaffene Welt realer oder präsenter als die reale Welt“ ( $t(14) = 2.42, p < .05, d = 0.62$ ).

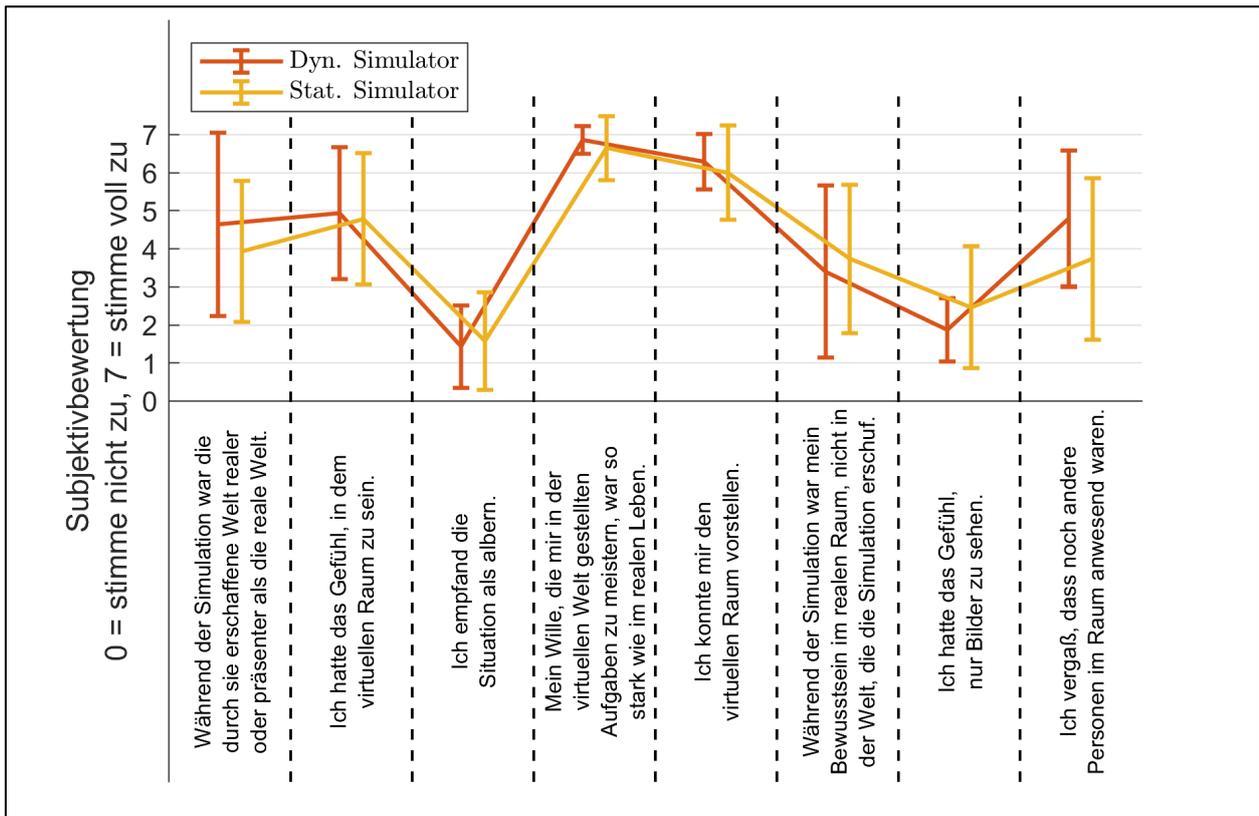


Bild 5-21: Mittlere Bewertung der acht Items der Präsenzbefragung, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.

Der abschließende Teil der Nachbefragung richtet sich an die akustischen Rückmeldungen des Simulators. In beiden Simulationsumgebungen wird die Lautstärke der akustischen Rückmeldung als etwas zu gering beurteilt ( $t(14) = -0.62, p = .546$ ; Bild 5-22 links). Die Bewertung der Realitätstreue der akustischen Rückmeldung der beiden Simulatoren wird in beiden Umgebungen als moderat bewertet ( $t(14) = -0.95, p = .361$ ) (Bild 5-22 rechts).

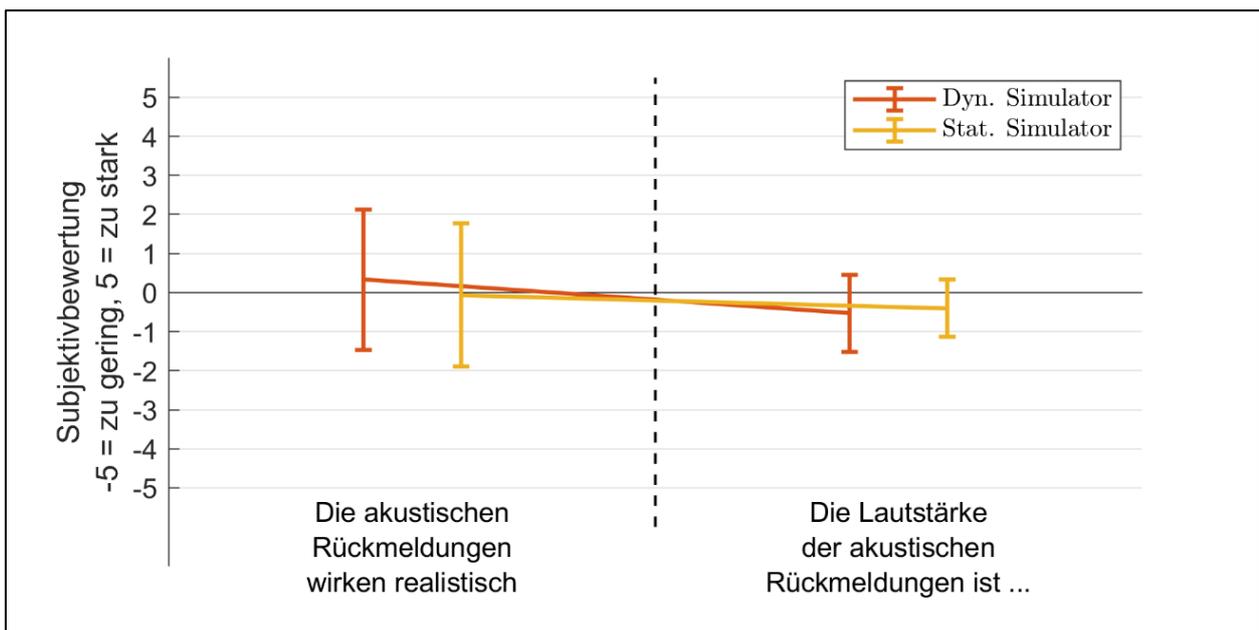


Bild 5-22: Mittlere Bewertung der Fragen: "Die akustischen Rückmeldungen wirken realistisch" und "Die Lautstärke der akustischen Rückmeldungen ist...", aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.

Die Fahrer wurden im Fall einer negativen Bewertung der Realitätstreue der akustischen Rückmeldungen gebeten eine Begründung für ihr Urteil abzugeben. Im Falle des dynamischen Simulators wurde von Seiten der Fahrer bemängelt, dass Umgebungs- und insbesondere Windgeräusche fehlen bzw. zu leise ausfielen. Für den statischen Simulator wurde zusätzlich die Umsetzung der Motorengeräusche bemängelt. Diese werden teilweise als zu leise oder als unpassend bezüglich der Drehzahlrückmeldung beurteilt.

### Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Nachbefragung

Zur späteren Diskussion wird für die beschriebenen Ergebnisse aus der Nachbefragung Folgendes festgehalten:

<b>NB1</b>	Beide Simulatoren werden gleichermaßen als mäßig realistisch bewertet. Die Fahrer bewerteten die Kräfte der Lenkung am dynamischen Motorradsimulator signifikant besser, den Gesamteindruck der Lenkung als tendenziell besser als in der statischen Motorradsimulation.
<b>NB2</b>	Im statischen Simulator wird das Folgen der Fahrspur als leichter umsetzbar empfunden.
<b>NB3</b>	Das Präsenzerleben wurde für beide Simulatoren ähnlich bewertet; vereinzelt zeigen sich Tendenzen zu Gunsten des dynamischen Simulators. Für beide Umgebungen zeigt sich aber eine große Heterogenität in den Bewertungen.
<b>NB4</b>	Die akustischen Rückmeldungen werden in beiden Simulationsumgebungen als mäßig realistisch bewertet.

### 5.3 Diskussion der Ergebnisse – Probandenstudie

In der Probandenstudie wurden drei Teilstudien durchgeführt, die auf den Ergebnissen der Verifikationsstudie aufbauend die beobachteten Phänomene hinsichtlich ihrer Konsistenz näher beleuchten sollten, um damit erste Aussagen bezüglich der Additivität der Minimalszenarien treffen zu können und die Eignung der gewählten Methode zu beurteilen.

Über alle Fahraufgaben zeigte sich in der statischen Simulation ein deutlich stabileres Fahrverhalten und in der dynamischen Simulation je nach Geschwindigkeitsbereich ein instabileres Fahrverhalten als in der Realfahrt. Dieses Ergebnis entspricht den Beobachtungen aus der Verifikationsstudie. Auch bei Kurvenfahrten mit Landstraßengeschwindigkeit zeigten sich in der dynamischen Simulation Schwankungen des Rollwinkels, die zum Teil negativ wahrgenommen werden, gleichzeitig jedoch einen besseren Eindruck über die systembedingte Eigeninstabilität des Motorrades erlauben. Auch lag die (im Straßenverkehr selbst gewählte) Geschwindigkeit – und damit der Rollwinkel – in der dynamischen Simulation auf einem geringeren Niveau, was eine gewisse Vorsicht und Zurückhaltung im Umgang mit dem Simulator widerspiegelt, die einige Fahrer auch im Nachgang geäußert hatten. Außerdem entspricht dieses Ergebnis der Nachbefragung, in der die Fahrer angaben, dass das Folgen der Fahrspur mit dem statischen Simulator leichter vonstattengehe als mit dem dynamischen Simulator. Diese größere Einfachheit im Umgang mit dem Simulator könnte auch der Grund dafür sein, dass in der statischen Simulation höhere Geschwindigkeiten für besagte Kurvendurchfahrten gewählt werden. Es kann somit angenommen werden, dass die Fahrer versuchen, die höhere Beanspruchung des dynamischen Fahrsimulators durch niedrigere Geschwindigkeiten zu kompensieren.

Ein weiteres Indiz für diese Annahme ist die subjektiv berichtete Beanspruchung durch die Bedienung des RSVP, die keinen Effekt für die Umgebungen zeigte. Nachdem die Fahraufgabe am dynamischen Simulator als beanspruchender bewertet wird, wäre davon auszugehen, dass für eine zusätzliche Nebenaufgabe noch weniger Ressourcen verbleiben und dadurch die Bedienung des RSVP im dynamischen Simulator ebenfalls als beanspruchender erlebt wird. Dies ist jedoch nicht der Fall. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Fahrer die Beanspruchung der Fahraufgabe mittels niedrigerer Geschwindigkeiten reduzieren und

damit den RSVP als ebenso beanspruchend bewerten wie in den anderen Umgebungen. In den Reaktionszeiten der Nebenaufgabe zeigten sich sogar bessere Ergebnisse der dynamischen Simulation und in der prozentualen Erfolgsrate in der statischen Simulation. Beide Simulationsumgebungen schnitten folglich nach objektiven Kriterien besser ab als die Realfahrt, was den bisherigen Erkenntnissen widerspräche, wenn nicht bereits die RSVP-Bedienung im Stand in der Realfahrt schlechter abschnitte. Dies deutet darauf hin, dass die besseren Leistungen in den Simulatoren auf eine bessere Wahrnehmung der relevanten Stimuli zurückzuführen sind und nicht auf eine geringere Beanspruchung während der Ausführung der Fahraufgabe. Hieraus lässt sich weiterhin ableiten, dass vor der Durchführung von HMI-Studien an Simulatoren die Licht- und damit die Sichtverhältnisse überprüft werden müssen, da ansonsten eine visuelle Darstellung, die in der Simulation problemlos erkannt wurde in der Realität übersehen werden könnte.

Auch für die Manöver Ausweichen bzw. Ausweichen und Bremsen zeigten sich die Unterschiede in der Stabilität zwischen den Versuchsumgebungen. Obwohl die Trajektorienverläufe in der statischen Simulation der Realfahrt besser entsprachen als die Verläufe der dynamischen Simulation, bewerten die Fahrer ihre eigene Fahrkompetenz in der statischen Simulation als geringer. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass die Fahrer trotz der besseren Aufgabenerfüllung das unnatürliche Fahrverhalten des statischen Simulators entsprechend bewerten. Dennoch zeigten sich trotz der objektiv signifikant schlechteren Fahrkompetenzen in der dynamischen Simulation die subjektiven Bewertungen hinsichtlich der Aufgabenerfüllung nur tendenziell schlechter.

In der Nachbefragung zeigte sich für den Gesamteindruck ein von der Verifikationsstudie abweichendes Bild. Beide Simulatoren wurden von den Probanden gleichermaßen als mäßig realistisch bewertet, wohingegen in der Verifikationsstudie ein besseres Ergebnis für die dynamische Simulation erzielt wurde. Dennoch bewerteten die Fahrer im Einklang mit der Verifikationsstudie die Kräfte an der Lenkung am dynamischen Motorradsimulator signifikant besser und den Gesamteindruck der Lenkung als tendenziell besser. Das Spurfolgevermögen wird im statischen Simulator im Vergleich zum dynamischen Simulator als einfacher bewertet. Es ist jedoch erneut darauf hinzuweisen, dass „einfacher“ nicht zwingend mit „realistischer“ gleichzusetzen ist. Ebenfalls analog zur Verifikationsstudie zeigten sich nur geringe Unterschiede in der Präsenzbeurteilung. Von acht Items wird der dynamische Simulator in einem signifikant besser bewertet und in vier Items tendenziell besser, während in den restlichen drei Items der statische Simulator tendenziell besser bewertet wird.

Zusammengefasst entsprechen die Beobachtungen aus der Probandenstudie den Erwartungen, die aus der Verifikationsstudie hervorgingen. Dennoch zeigten sich auch Aspekte, die die Einschätzungen aus der Verifikationsstudie modifizieren. So stellt sich insbesondere die Beurteilung der fahraufgabeninduzierten Beanspruchung als komplexer dar. Während sich in der Verifikationsstudie deutliche Unterschiede in der erlebten Beanspruchung fanden, zeigten sich in den RSVP-Fahrten der Probandenstudie keine subjektiven Unterschiede zwischen den Bedingungen. Der Grund hierfür liegt potenziell darin, dass die Fahraufgaben der Verifikationsstudie genau definierten, welches Fahrverhalten gezeigt werden soll, was über die verbindliche Vorgabe von Geschwindigkeiten und Wegmarken erfolgte. Im Rahmen der Probandenstudie wurden weniger strenge Vorgaben gemacht, was den Fahrern eine Kompensation der fahraufgabeninherenten Schwierigkeit ermöglichte. Es erscheint also ratsam, beim Einsatz von Simulatoren als Untersuchungswerkzeug strenge Manörovorgaben zu machen, wenn die Fahrerbeanspruchung Gegenstand der Fragestellung ist oder von einem großen Einfluss ausgegangen werden muss.

## **6 Bewertung der Methodik**

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine neuartige Validierungsmethodik für Fahrsimulatoren am Beispiel von Motorradsimulatoren vorgestellt und die Ergebnisse zweier Studien präsentiert, die erste Erkenntnisse zur Bewertung der Methodik bieten sollen.

Die in Kapitel 2.2 und 2.3 aufgezeigten Ansätze zur Validitätsbewertung gehen von einer globalen Beurteilung der Validität für einzelne Parameter in einzelnen Fahraufgaben aus, wodurch streng betrachtet eine Neubewertung für jede einzelne Fahraufgabe notwendig wird. Hierdurch entsteht ein sehr hoher Aufwand zur Validierung eines Simulators. Der Ansatz der im vorliegenden Bericht vorgestellt wurde, versucht eben diese Einschränkungen zu umgehen, indem die kleinsten Bestandteile der Fahraufgaben untersucht werden. Jedoch müssen hierfür Annahmen erfüllt sein, die das Vorgehen legitimieren. Insbesondere stellt sich

die Frage, ob die beiden eingangs getroffenen Annahmen „Zerlegbarkeit von Fahraufgaben“ und „Additivität von Minimalszenarien“ auf Basis der bisherigen Erkenntnisse gestützt werden können oder ob diese Annahmen als widerlegt betrachtet werden müssen. Im Folgenden wird hierfür eine Zusammenfassung der wichtigsten Argumente gegeben, die für und gegen die getroffenen Annahmen der Methodik sprechen.

Für die Methodik sprechen zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Beobachtungen, dass sich grundlegende Charakteristika hinsichtlich der Stabilität der Simulationsumgebungen unabhängig von der Minimalszenarienkombination zeigen. So zeigte sich der statische Motorradsimulator als übermäßig stabil, was sich in allen Fahrdaten und den subjektiven Bewertungen widerspiegelt. Umgekehrt zeigt sich der dynamische Motorradsimulator insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten instabiler als die Realfahrt. Die Erwartungsverletzung, die bezüglich der Stabilität von Kurvenfahrten mit Landstraßengeschwindigkeit gemacht wurde, stellt keine Verletzung der Minimalszenarienannahmen dar, da sich diese zwischen Kurvenfahrt und konstanter Geradeausfahrt unterscheiden.

Sowohl in der Verifikationsstudie als auch in der Probandenstudie zeigte sich der statische Motorradsimulator im absoluten Beanspruchungsniveau näher an der Realfahrt. Für den dynamischen Simulator zeigte sich in beiden Untersuchungen ein absolut höheres Beanspruchungsniveau als in den beiden anderen Bedingungen. Jedoch lag in der Probandenstudie ein entgegengesetzter Befund vor. Wenngleich Reaktionszeiten und Erfolgsraten in den Fahrten mit RSVP ein besseres Abschneiden auf den Simulatoren andeuten, zeigt die erlebte Beanspruchung keinen Unterschied zwischen den Versuchsumgebungen. Dies könnte auf Kompensationshandlungen der Fahrer – z.B. eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit – zurückzuführen sein. Aus den Ergebnissen der Verifikationsstudie wäre zu erwarten gewesen, dass die erlebte Beanspruchung im dynamischen Simulator höher wäre als in der Realfahrt und der statischen Simulation, was sich jedoch nicht zeigte. Eine weitere Erklärung für diese Diskrepanz könnte in der Enge der Kurvenradien der Ovalfahrt liegen. Dieser Befund stellt eine Einschränkung der Methode dar, da der Kurvenradius, der für die RSVP-Fahrt gewählt wurde in der vorangegangenen Verifikationsstudie nicht untersucht wurde. Für den weiteren Einsatz der Methodik sollten umfassendere Minimalszenarienparametrierungen (z.B. der Bereich an untersuchten Kurvenradien, Kurvendurchfahrtsgeschwindigkeiten etc.) durchgeführt werden. Potenziell stellen die großen Lenkwinkel, die in der statischen Simulation für das Fahren von Kurven benötigt werden eine zusätzliche Beanspruchungskomponente dar (die Fahraufgabe wird folglich schwieriger), die zuvor in dieser Form nicht betrachtet werden konnte. Ebenso stellt sich die bessere Bewertung der Fahrkompetenz für die Aufgabe Ausweichen- und Bremsen als interpretatorische Herausforderung dar, da die Fahrtverläufe in der statischen Simulation deutliche näher an der Trajektorie der Realfahrt liegen.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt Argumente für, aber auch Indizien gegen die entwickelte Methodik vorliegen. Diese lassen sich letztlich nur über die Durchführung weiterer Studien abschließend beurteilen, in denen Minimalszenarien in einem größeren Dynamikumfang (Geschwindigkeitsbereiche, maximale Beschleunigungen und Verzögerungen, Kurvenradien etc.) einbezogen werden. Für solche Studien wird empfohlen, größere Stichprobenzahlen heranzuziehen, als es im Rahmen dieses Projektes möglich war. Dennoch soll auf dem vorhandenen Erkenntnisstand bewertet werden, wann sich die Methode zur Beurteilung der Validität eines Fahrsimulators eignet.

Der Hauptvorteil gegenüber konventionellen Validierungsmethoden besteht in den geringeren Aufwänden, die zur umfassenden Beschreibung der Simulatoren benötigt werden. Hierdurch können mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Studien relativ weitreichende Aussagen über die Anwendungsfelder eines Simulators getroffen werden. Die Verlagerung des Fokus auf weitreichende Aussagen hat dabei einen gewissen Detailverlust zur Folge. So ist davon auszugehen, dass eine Validierungsstudie, die sich unter Berücksichtigung multipler Parameter (vgl. BLAAUW, 1982, ESPIÉ ET AL., 2005, ZÖLLER, 2015) auf einen Anwendungsfall bezieht, deutlich detailliertere Aussagen zulässt, als es auf Basis der hier vorgestellten Methodik möglich ist.

Die Entscheidung welche Form der Validierungsmethodik gewählt werden kann, sollte also auch maßgeblich davon abhängen, welche Einsatzzwecke für einen Simulator in Frage kommen. Die vorliegende Studie ließe sich folglich als Komplementärentwurf zur konventionellen Methodik beschreiben, die im Gegensatz zur minutiösen Detailabbildung eines einzelnen Anwendungsfalles (z.B. zur Beurteilung von HMI-Konzepten oder zur Abstimmung von Fahrwerkskomponenten) einen größeren Überblick über die Gesamtheit potentieller Anwendungsfälle gibt. In Konsequenz hängt die Wahl der Methodik also auch vom vorhandenen Vorwissen ab, das bereits über den zu validierenden Simulator (oder ähnliche Aufbauten) vorliegt. Für

Motorradsimulatoren, über deren Einsatzmöglichkeiten bisher insgesamt wenig in Erfahrung gebracht werden konnte, stellt die Methode folglich eine Möglichkeit dar, eine erste Einschätzung vorzunehmen, die dann nach Bedarf mit detailreicheren Einzelstudien ergänzt werden kann.

Bezüglich der Beurteilung der vorliegenden Validitätseinteilung in absolute, relative und keine Validität wird für die vorliegenden Studien und die Methodik Folgendes festgehalten.

Das Vorhandensein absoluter Validität kann für einen Simulator als Gesamtsystem nie vorliegen, da selbst bei einem sehr großen technischen Aufwand immer Abweichungen zur Realität auftreten. Ein Vorhandensein relativer Validität wird daher als hinreichend betrachtet (vgl. z.B. BLAAUW, 1982, GODLEY ET AL., 2002, CAIRD & HORREY, 2011). Im vorliegenden Projekt wurde weitestgehend auf abschließende Beurteilung der Validität verzichtet, was zum einen an der Größe der untersuchten Stichprobe liegt zum anderen aber an den Einschränkungen der Möglichkeiten bei der Validitätsbeurteilung, die in Kapitel 3.3 genannt wurden. Anstelle dessen wurden Eigenschaften der Versuchsumgebungen über unterschiedliche Minimalszenariokombination hinsichtlich ihrer Konsistenz beurteilt. Um eine abschließende Bewertung der Validität vorzunehmen, wäre eine deutlich größere Stichprobe an Normalfahrern notwendig (vgl. ESPIÉ ET AL., 2005).

Des Weiteren erscheinen folgende Untersuchungsaspekte als sinnvoll, um eine weitere Bewertung der Methodik vorzunehmen:

Weiterer Untersuchungsbedarf ergibt sich insbesondere für Landstraßengeschwindigkeiten, die im vorliegenden Projekt nicht im Fokus standen. Insbesondere für Kurvenfahrten wären weitere Erkenntnisse zum Einfluss der Geschwindigkeit relevant, um die Eignung der Methode weiter zu beurteilen. Eine größere Menge an Kurvenmaterial wäre für die Einschätzung des Einflusses des Fahrbahnverlaufs und der Kurvenradien von großer Bedeutung, da hierdurch der Bereich (in diesem Fall also größere und kleinere Kurvenradien bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten), über den mittels der Minimalszenarien Aussagen getroffen werden können, deutlich vergrößert würde.

Des Weiteren wäre auch für die Beurteilung der Ergebnisse aus der Probandenstudie eine Untersuchung unterschiedlicher Dynamikabstufungen (z.B. Ausweichen bzw. Ausweichen und Bremsen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten) sinnvoll gewesen, was aber im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht umsetzbar gewesen wäre. Mögliche Folgeuntersuchungen sollten zur besseren Einschätzbarkeit der Erkenntnisse deswegen versuchen diese Lücke zu schließen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie, welche auf zwei exemplarischen Simulatoren gesammelt wurden, nicht zwangsläufig auf andere Simulatoren übertragen werden können. So können kleine Änderungen an einzelnen Simulatorkomponenten (Lenkung, Sichtsystem, Bewegungserfassung, Schaltung, Windgeräusche, ...) oft Kreuzbezüge zu anderen Komponenten besitzen. Eine geänderte Perspektive führt z.B. zu einer verzögerten Trajektorienplanung, diese wiederum zu späteren, aber zwangsläufig heftigeren Lenkeingaben, diese wiederum zu stärkeren Rollbewegungen, woraus eine Unsicherheit des Probanden folgt, die sich in reduzierten Geschwindigkeiten und damit steigender Instabilität auswirken kann. Dieses Beispiel zeigt, dass vermeintlich zusammenhanglose Größen (z.B. Augpunkthöhe und Rollwinkel) im virtuellen System Fahrer-Motorrad-Umwelt nicht voneinander zu trennen sind. Somit besteht Forschungsbedarf bezüglich der Interaktion einzelner Subsysteme der Simulation. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass die Veränderung eines Subsystems der Simulation eine Veränderung des Gesamtsystems mit sich brächte. Um abzuschätzen, wie sich die Änderung eines Subsystems auf das Gesamtverhalten eines Simulators auswirkt, wären weitere Studien notwendig, die bei einer reduzierten Anzahl an Minimalszenarien systematische Änderungen dieser Art vornehmen würden.

Zusammenfassend lässt sich zum gegenwärtigen Stand für die Anwendung der Methode folgendes festhalten:

Die grundlegenden Annahmen – also, dass komplexe Fahraufgaben in Minimalszenarien zerlegt und wieder zu komplexen Fahraufgaben zusammengesetzt werden können – scheinen zum gegenwärtigen Zeitpunkt als gültig. Dem Anwender der Methode wird folglich empfohlen, wie im vorliegenden Projekt, das Spektrum relevanter Fragestellungen zu erarbeiten und auf dieser Basis Minimalszenarien abzuleiten. Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass Minimalszenarien nur seriell und nicht parallel auftreten dürfen.

Bei der Parameterauswahl für die Untersuchung der Minimalszenarien stellte sich im vorliegenden Projekt ein breites Spektrum zur Berücksichtigung unterschiedlicher Validitätsdimensionen als wichtig heraus, weswegen dieses Vorgehen auch Anwendern der Methode empfohlen wird. Für die konkrete Untersuchung der Minimalszenarien wird weiterhin empfohlen, die für mögliche Anwendungsfelder notwendigen Dynamikbereiche möglichst vollständig abzudecken (also Geschwindigkeitsbereiche, Beschleunigungen und Verzögerungen, Kurvenradien etc.). Zusätzlich wird empfohlen, bereits bei der Verifikation der Minimalszenarien eine repräsentative Stichprobe an Normalfahrern heranzuziehen (vgl. auch ESPIÉ ET AL., 2005).

Die Additivität von Minimalszenarien konnte im Rahmen des vorliegenden Projektes lediglich stichprobenartig überprüft werden. Wenngleich diese Überprüfung vielversprechende Indizien liefert, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen, ob die Additivität auf weitere Manöver und Dynamikbereiche extrapolierbar ist.

## 7 Anwendungsfälle von Motorradsimulatoren

Die im vorangegangenen Bericht diskutierten Versuchsaufbauten sind geeignet, die Durchführbarkeit verschiedener Fahrmanöver auf bestimmten Fahrsimulatoren zu überprüfen und sie bezüglich subjektiver und objektiver Kriterien zur Realfahrt in Relation zu stellen. Exemplarisch wurde je ein dynamischer und statischer Motorradsimulator auf seine Nutzbarkeit überprüft. Es zeigte sich, dass die Nutzung des dynamischen Simulators zwar als realitätsnäher, gleichzeitig jedoch auch als herausfordernder wahrgenommen wird. Die niedrigere Fahrerbeanspruchung am statischen Simulator zeigt sich in den durchgeführten Versuchen mit den in Realfahrten gemessenen Beanspruchungen auf ähnlichem Niveau. Dies wird jedoch mit verringertem Realismus erkauft. Wünschenswerte Anwendungen für (Motorrad-)Fahrsimulatoren sind vielfältig:

- Fahrtrainings mit unterschiedlichen Ausprägungen (Gefahrenwahrnehmung, Bedienung von Assistenzsystemen, Fahrtechnik, Kurventraining, ...) könnten in einer risikofreien Umgebung stattfinden.
- Fahrzeugentwickler könnten Fahrwerkskomponenten abstimmen und innovative Systeme (bspw. Notbrems- oder Ausweichassistenten) entwickeln, ohne dabei teure Prototypen und Applikationsfahrer unnötigen Risiken aussetzen zu müssen.
- Anwendungsentwickler könnten das Design von Mensch-Maschine-Schnittstellen hinsichtlich Fahrerablenkung oder Bediendauer optimieren, ohne die Probanden dem unkontrollierten Realverkehr aussetzen zu müssen.
- U.v.m.

Für den Anwender besteht der Wunsch nach einem universell einsetzbaren Fahrsimulator, welcher gleichsam für eine Vielzahl solcher Untersuchungen herangezogen werden kann. Unterschiedliche Untersuchungsschwerpunkte erfordern jedoch auch unterschiedliche Fähigkeiten und Stärken der genutzten Untersuchungswerkzeuge. Nach derzeitigem Stand der Technik ist es noch nicht möglich, die Stärken beider Simulatorarten – statisch wie dynamisch – in einem Produkt zu vereinen. Insbesondere erhebt sich hier augenscheinlich ein Kompromiss aus Kontrollierbarkeit (→ statischer, abstrakter, vereinfachter Simulator) und Realitätsnähe (→ dynamischer, reaktiver, komplexer Simulator).

Eine ausdrückliche Anweisung, welcher Simulator nun für welche Studie „der einzig richtige“ ist, ist auch auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse nur schwer möglich. Diese liefern in erster Linie Aussagen über die beiden hier genutzten Simulatoren und in welchen Fragestellungen sie besser, oder schlechter nutzbar sind. Eine Verallgemeinerung auf andere statische oder dynamische Motorradsimulatoren ist nur sehr bedingt möglich, da bereits kleine Änderungen an technischen Ausprägungen des Simulators große Auswirkungen auf das Fahrerverhalten haben können. Allerdings ergeben sich Hinweise, dass die im Projekt entwickelte Methodik eine praktikable Möglichkeit darstellt, verschiedene Simulatoren hinsichtlich Ihrer Anwendbarkeit bewerten zu können.

Diese neuartige Validierungsmethodik geht von einer Zerlegbarkeit von Fahraufgaben in ihre kleinsten Bestandteile, die sogenannten Minimalszenarien, aus. In zwei Studien konnten erste Indizien gesammelt werden, die für die Nutzbarkeit der Methodik sprechen. Folglich scheint es – wenn auch mit gewissen Einschränkungen - möglich zu sein, die Erkenntnisse, die über einen spezifischen Simulator in einzelnen Minimalszenarien gesammelt werden konnten, auf Zusammensetzungen dieser übertragen zu können. Auf

dieser Basis soll nun abschließend eine Aussage zu den Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren gegeben werden. Die Herausforderung hierbei liegt insbesondere in der Bandbreite möglicher Fragestellungen, was am Beispiel von Motorradtrainings kurz erläutert werden soll.

Um eine Aussage über die Anwendbarkeit einer Versuchsumgebung für Motorradtrainings zu tätigen, muss zunächst eingegrenzt werden, wie das entsprechende Training geartet ist. Handelt es sich um ein Training, das sich mit dem Erkennen von Gefahren und der Einleitung einer adäquaten Reaktion beschäftigt, steht einer Untersuchbarkeit im statischen Simulator nichts im Wege. Soll das Training jedoch die Durchführung einer Gefahrenbremsung anvisieren, kann nicht von einer Eignung ausgegangen werden, da dringend benötigte haptisch/ propriozeptive Hinweisreize nicht gegeben werden. Eine Nutzung des dynamischen Motorradsimulators könnte jedoch noch eingeschränkt möglich sein. Legt man den Trainingsbegriff abermals anders aus und beschäftigt sich mit dem Kennenlernen der Schräglagengrenzen, scheint auch eine Nutzung des dynamischen Simulators als nicht angebracht, da die hierfür benötigten detaillierten Interaktionen von Fahrzeugverhalten und Fahrerverhalten – zumindest in absehbarer Zeit – nicht dargestellt werden können. Die Anzahl möglicher Trainingsvarianten, ließe sich auf diese Weise weiterführen, was alleine für den Bereich des Trainings ein sehr großes und heterogenes Spektrum möglicher Einschätzungen der Simulatoreignung mit sich brächte. Entsprechend ergeben sich auch für weitere potenzielle Anwendungsfelder (bspw. warnende Assistenzsysteme, eingreifende Assistenzsysteme, HMI-Beurteilung usw.) große Divergenzen in den Einschätzungen, die abermals von der konkreten Fragestellung abhängig sind.

Da eine globale Eignungsbeurteilung nicht angebracht scheint, wird stattdessen ein Entscheidungsbaum (Bild 7-1) vorgeschlagen, der den Auswahlprozess der Versuchsumgebung vereinheitlichen soll.

Für den Entscheidungsbaum werden folgende Bewertungsebenen betrachtet.

- Sicherheitsrisiko:
  - o In erster Instanz muss die Frage geklärt werden, ob die Untersuchung einer gegebenen Fragestellung ein Sicherheitsrisiko darstellt. Im Falle eines geringen Risikos oder im Falle geringer Aufwände zur Risikoreduktion (vgl. Block „Aufwände?“ in Bild 7-1), sollte zum gegenwärtigen Stand ein Realfahrzeug zur Untersuchung herangezogen werden
- Veto gegen die Simulation
  - o Im Falle einer hohen Risikobewertung für die zu untersuchende Fragestellung auf dem Realfahrzeug, muss die Frage gestellt werden, ob eine Untersuchung mit Hilfe eines Simulators durchgeführt werden kann. Sollte dies nicht möglich sein, kann eine Anpassung des Versuchsaufbaus in Erwägung gezogen werden (nächster Spiegelstrich). Sollte kein Veto vorliegen, sollte die Auswahl des verwendeten Simulators in Abhängigkeit der Fragestellung erfolgen.
- Anpassung des Versuchsaufbaus/Trainings
  - o Liegt zunächst ein Veto gegen die Simulation vor, kann die Anpassung des Versuchsaufbaus in Erwägung gezogen werden. Sollte dies nicht möglich sein, ist die Studie unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht durchführbar. Sollte eine Anpassung des Versuchsaufbaus in Frage kommen, muss eine Neubewertung des Risikos stattfinden.
- Fokus der Fragestellung/des Trainings
  - o Sollte der Einsatz eines Simulators prinzipiell zielführend sein, muss abgewogen werden, ob eine Untersuchung mit Hilfe eines statischen oder eines dynamischen Motorradsimulators durchgeführt werden soll. Hierbei können mögliche Ausrichtungen Bild 7-1 entnommen werden.

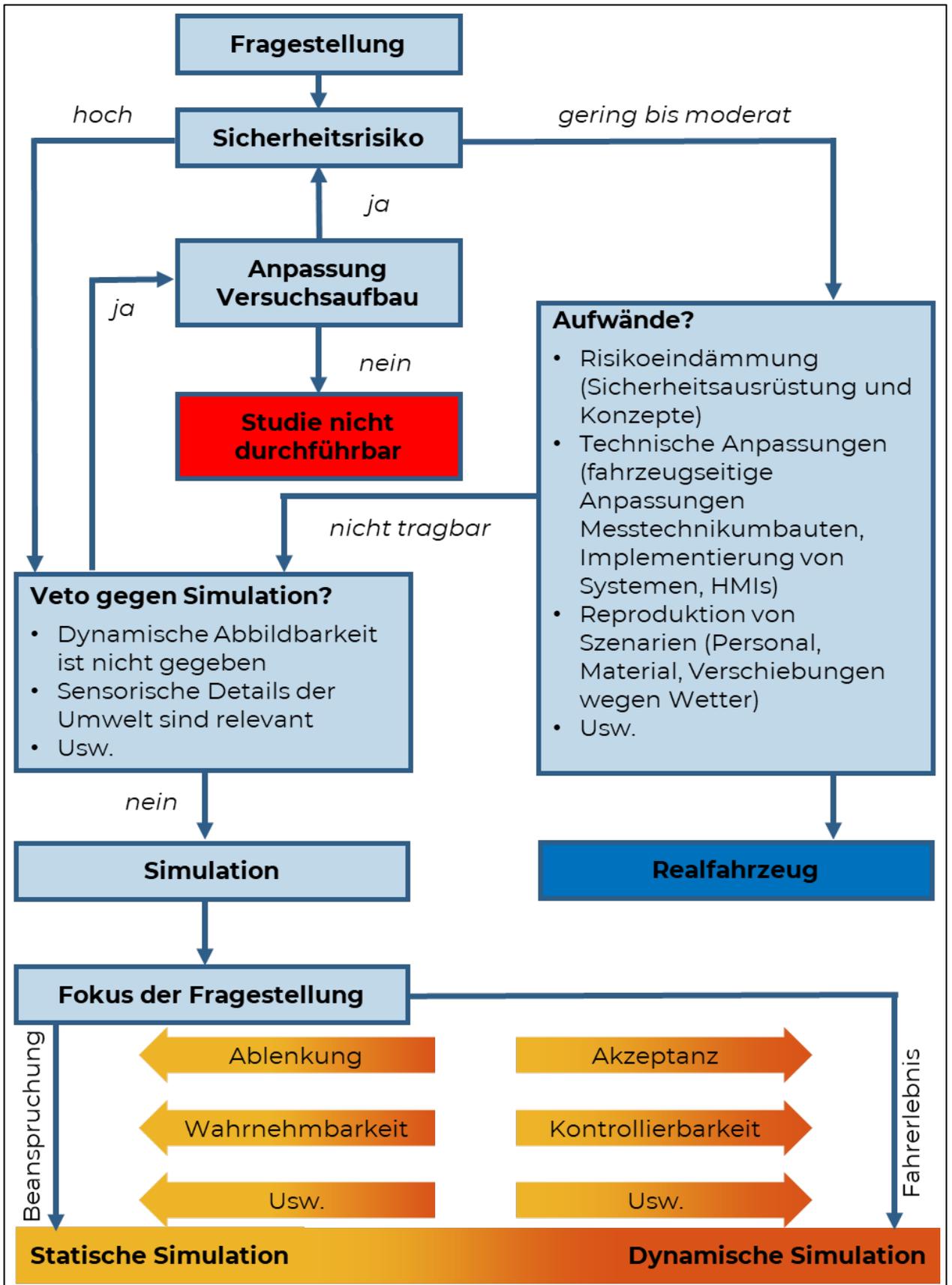


Bild 7-1: Entscheidungsbaum zur Auswahl einer Untersuchungsumgebung.

Im Folgenden wird der Entscheidungsprozess an einem Beispiel erläutert<sup>9</sup>.

Am Anfang des Entscheidungsbaums steht die jeweilige ‚Fragestellung‘ der Untersuchung:

- Als Basis sei die Untersuchung unterschiedlicher HMI-Varianten zur Warnung vor einem bremsenden Vorderfahrzeug gegeben.
  - Hierbei seien eine akustische Rückmeldung und eine Warnung, die im Display dargestellt wird, als unabhängige Variable gegeben.
- Für die Betrachtung der Effekte sollen als abhängige Variablen die Reaktionszeit auf die Warnung und der benötigte Bremsweg sowie die Beurteilung der Fahrer hinsichtlich der Passung zwischen Situation und Warnung herangezogen werden.

Da die Realfahrt bezüglich der Aussagekraft der Ergebnisse einem Simulator grundsätzlich überlegen ist, wird im Entscheidungsbaum als erstes geprüft, ob eine Untersuchung am Realfahrzeug möglich ist. Hierfür wird zunächst das Risiko (‚Sicherheitsrisiko‘) beurteilt, das bei einer Untersuchung in der Realfahrt auftritt (vgl.: STEDMON ET AL., 2009, BLANA, 1996, BREUER, 2009, CAIRD & HORREY, 2011). Im Falle der Beispielfragestellung ist eine fahrerseitige Bremsung notwendig, um das Auffahren auf ein bremsendes Vorderfahrzeug zu verhindern. Das Risiko, das der Fragestellung innewohnt, ist folglich als „hoch“ zu bewerten. Jedoch scheinen Maßnahmen möglich, die eine Reduktion des Risikos mit sich bringen, weswegen eine entsprechende Einschätzung der ‚Aufwände‘ für die Realisierung in der Realfahrt durchgeführt wird.

- Zur Durchführung der Untersuchung ist ein abgesperrtes Gelände notwendig.
- Zur Implementierung der HMI-Varianten und zur zeitgerechten Auslösung sind technische Aufwände notwendig, die unter anderem die Ausstattung der Probandenhelme mit einheitlichen Kopfhörern und die Montage eines Zusatzdisplays erfordern.
- Zur Reduktion des Risikos durch die Fahraufgabe ist eine Vorrichtung zum Verhindern des Auffahrens auf das Vorderfahrzeug notwendig. Zusätzlich muss Personal für das Fahren des Vorderfahrzeugs eingeplant werden.
- Eine Versuchsdurchführung bei unterschiedlichen Wetterbedingungen verändert die Sichtbarkeit der visuellen Warnung. Eine nasse Fahrbahn stellt ein zusätzliches Sicherheitsrisiko dar. Entsprechend müssen hinreichend Pufferzeiten eingeplant werden.

Der Aufwand zur Untersuchung in der Realfahrt kann folglich und insbesondere bezüglich der Kollisionsvermeidung als sehr hoch beschrieben werden, was im gegebenen Beispiel nicht mit dem vorhandenen Budget vereinbar sei.

Im nächsten Schritt muss daher im Entscheidungsbaum beurteilt werden, ob ein klares ‚Veto gegen die Simulation‘ vorliegt, die nicht von einer Untersuchbarkeit der Fragestellung ausgehen lässt (hierbei sei auch auf die Überlegungen von PURUCKER ET AL., 2018 und ESPIÉ ET AL., 2005 in Kapitel 2.1 verwiesen). Für diese Beurteilung ist es notwendig, die Kenntnisse aus den Untersuchungen der Minimalzenarien zu Rate zu ziehen. Bestünden z.B. bereits an dieser Stelle Bedenken hinsichtlich der dynamischen Abbildbarkeit, wäre nach dem Entscheidungsbaum eine Anpassung des Versuchsaufbaus zu diskutieren, der entweder zu einer Neubewertung führt oder aber zur Entscheidung, dass die Studie nicht durchführbar ist.

Da es sich bei der Fragestellung im vorliegenden Beispiel um eine Fahraufgabe mit geringen dynamischen Anforderungen handelt, ist auf Basis des vorliegenden Projekts jedoch nicht von einem pauschalen ‚Veto gegen die Simulation‘ auszugehen.

Nach der Entscheidung für die Untersuchung in einer Simulationsumgebung muss weiter differenziert werden, wo der Schwerpunkt der vorliegenden Studie angesiedelt ist (‚Fokus der Fragestellung‘; bezüglich der Bedeutung der Parameterauswahl sei hierfür abermals auf BLAAUW, 1982, ESPIÉ ET AL., 2005 und ZÖLLER, 2015 verwiesen). Soll insbesondere die Wahrnehmbarkeit der Warnungsmodalitäten beschrieben werden, kann eine Untersuchung auf dem statischen Simulator adäquat sein, da die Beanspruchung dort besser übereinstimmt und folglich von einer besseren Entsprechung der Wahrnehmung der Warnung ausgegangen wird. Steht jedoch die Frage im Fokus, wie angemessen eine Warnung für eine gegebene Situation wahrgenommen wird, wofür auch eine haptisch / propriozeptive Rückmeldung des Simulators notwendig erscheint, kann die Entscheidung zu Gunsten des dynamischen Simulators getroffen werden.

<sup>9</sup> Die Nennung der korrespondierenden Felder im Entscheidungsbaum erfolgt über die Markierung mit einfachen Anführungszeichen.

Jedoch sei hierbei abermals angemerkt, dass eine weitere Entwicklung des Stabilisierungsverhaltens notwendig erscheint.

Entsprechend des vorliegenden Beispiels muss also für jede spezifische Fragestellung eine Entscheidung auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse getroffen werden.

Die vorliegenden Studien zeigten verschiedene Stärken und Schwächen bestimmter Ausbaustufen von Fahrsimulatoren auf. Durch eine der Fragestellung angepasste Auslegung des Simulators hinsichtlich der bereitgestellten Ein- und Ausgabekanäle (insbesondere Sicht- und Bewegungssystem sowie Steuerungsgrößen), eignen sie sich in hohem Maße als Untersuchungswerkzeug. Da eine Simulation per Definitionem nur eine Nachbildung der Realität ist, welche zwangsläufig Abweichungen zu dieser aufzeigt, gilt es, diese Abweichungen außerhalb der untersuchungsrelevanten Bereiche auszulegen. So können Abweichungen in der Bewegungsdarstellung bspw. in HMI Fragestellungen toleriert werden, nicht jedoch in solchen Studien, bei denen das Fahrgefühl große Wichtigkeit besitzt.

Auf Basis des vorliegenden Projekts kann davon ausgegangen werden, dass sich statische Motorradsimulatoren, die über ein einfaches Fahrdynamikmodell verfügen, bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt für Fragestellungen eignen, die sich mit der Beanspruchung und Ablenkung von Fahrern beschäftigen, da sich, zumindest im Falle des untersuchten Simulators, eine gute Entsprechung der Fahrerbeanspruchung im Vergleich zur Realfahrt zeigte. Dynamische Simulatoren, die über eine komplexe Nachbildung des Fahrverhaltens eines Motorrads verfügen, zeigen Potentiale zur Abbildung des Verhaltens eines Motorrads. Bis jedoch ein weitreichender Einsatz möglich ist, sind weitere Entwicklungen notwendig. So ist im Falle des vorliegenden dynamischen Motorradsimulators eine Weiterentwicklung bezüglich des Stabilitätsverhaltens, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Agilität notwendig, um ein natürliches und einfaches Fahren zu ermöglichen. Dennoch kann bereits zum jetzigen Zeitpunkt festgehalten werden, dass Motorradsimulatoren Werkzeuge darstellen, die bei entsprechendem Einsatz, einen wichtigen Beitrag für die Forschung und Entwicklung im Motorradbereich leisten können. Insbesondere im Falle sicherheitsrelevanter Fragestellungen kann die Technologie eine bereichernde Ergänzung der Forschungsinfrastruktur darstellen.

## 8 Literaturverzeichnis

- ALLEN, R. W. & O'HANLON, J.F. (1979) 'Effects of Roadway Delineation and Visibility Conditions on Driver Steering Performance', *Transportation Research Record*, Bd. 739, S. 5-8.
- ANGELL, L. S. (2011) 'Surrogate Methods and Measures', in FISHER, D. L., RIZZO, M., CAIRD, J. K., LEE, J. D. (Hrsg.) *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. Boca Raton: CRC-Press, S. 10-1 – 10-13.
- BLAAUW, G. J. (1982) 'Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: A validation study', *Human Factors*, Jg. 24, Nr. 4, S. 473-486, doi: <https://doi.org/10.1177/001872088202400408>.
- BLANA, E. (1996) *Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review*. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 480.
- BORTZ, J. (2013). *Statistik: Für Sozialwissenschaftler*. Springer-Verlag.
- BREUER, J. (2009) 'Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen', in WINNER, H., HAKULI, S., WOLF, G. (Hrsg.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, S. 55-68, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9977-4>.
- BULD, S., WILL, S., KAUSSNER, A. & KRUEGER, H. (2014) *Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen. Untereinheit Fahrzeugtechnik, Heft F93.
- CAIRD, J. K. & HORREY, W. J. (2011) 'Twelve practical and useful questions about driving simulation', in FISHER, D. L., RIZZO, M., CAIRD, J. K., LEE, J. D. (Hrsg.) *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. Boca Raton: CRC-Press, S. 5-1 – 5-18.
- CSIKSZENTMIHALYI, M., AEBLI, H., AESCHBACHER, U. (2000) *Das Flow-Erlebnis: Jenseits von Angst und Langeweile: im Tun aufgehen*. 8. Aufl., Stuttgart: Klett-Cotta.
- DESTATIS. (2020a) 'Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2019'. Wiesbaden: Destatis. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-zweirad-5462408197004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-zweirad-5462408197004.pdf?__blob=publicationFile). Datum des letzten Abrufs 16.09.2020.
- DESTATIS (2020b) 'Verkehrsunfälle 2020', Fachserie 8, Reihe 7. Wiesbaden: Destatis.
- ESPIÉ, S., GAURIAT, P. & DURAZ, M. (2005) 'Driving Simulators Validation: The Issue of Transferability of Results Acquired on Simulator', *Proceedings of the Driving Simulation Conference North-America 2005*. Orlando, Florida, 30. November - 2. Dezember, S. 149-156.
- GODLEY, S. T., TRIGGS, T. J. & FILDES, B. N. (2002) 'Driving simulator validation for speed research', *Accident analysis & prevention*, Jg. 34, Nr. 5, S. 589-600.
- HELLER, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung. *Psychologische Beiträge*, 27, 478-493.
- HELLMANN, A. (2014) *Untersuchung zur Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Motorrad-Messfahrten im Realverkehr*. Masterthesis. TU Darmstadt.
- KRONMÜLLER, H. (1991) 'Korrelationsfunktion und Leistungsdichtespektrum', In: *Digitale Signalverarbeitung*. Hochschultext. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-86423-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-86423-0_11)
- LEONARD JR, J. J. & WIERWILLE, W. W. (1975) 'Human Performance Validation of Simulators: Theory and experimental verification', *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Jg. 19, Nr. 4, S. 446-456, doi: <https://doi.org/10.1177/154193127501900412>.
- MARTENS, M. & VAN WINSUM, W. (2000) *Measuring distraction: the peripheral detection task*. Soesterberg, Niederlande: TNO Human Factors Research Institute.

- PURUCKER, C., SCHNEIDER, N., RÜGER, F. & FREY, A. (2018) 'Validity of Research Environments—Comparing Criticality Perceptions Across Research Environments', in BENGLER, K., DRÜKE, J., HOFFMANN, S., MANSTETTEN, D., NEUKUM, A. (Hrsg.) UR:BAN Human Factors in Traffic. Wiesbaden: Springer, S. 423-446, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9>.
- SHERIDAN, T. B. (1992) 'Musings on telepresence and virtual presence', *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Jg. 1, Nr. 1, S. 120-126, doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>.
- SLATER, M. & WILBUR, S. (1997) 'A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments', *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Jg. 6, Nr. 6, S. 603-616, doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>.
- STEDMON, A.W., HASSELDINE, B., RICE, D., YOUNG, M., MARKHAM, S., HANCOX, M., BRICKELL, E. & NOBLE, J. (2009) "MotorcycleSim": An Evaluation of Rider Interaction with an innovative motorcycle simulator', *The Computer Journal*, Jg. 54, Nr. 7, S. 1010-1025, doi: <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxp071>.
- STEDMON, A.W., CRUNDALL, D., MOORE, D., (2017) 'Motorcycle simulator solutions for rider research' in 'Simulators for Transportation Human Factors: Research and Practice' S.67-87
- STEUER, J. (1992) 'Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence', *Journal of communication*, Jg. 42, Nr. 4, S. 73-93, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>.
- SUTHERLAND, I. E. (1968) 'A head-mounted three dimensional display', *Proceedings of the Fall Joint Computer Conference*, part 1. San Francisco, 9-11 Dezember. New York: Association for Computing Machinery, doi: <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>.
- UNDERWOOD, G., CRUNDALL, D., & CHAPMAN, P. (2011). 'Driving simulator validation with hazard perception'. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 14(6), 435-446.
- VAN WINSUM, W., MARTENS, M. & HERLAND, L. (1999) *The effects of speech versus tactile driver support messages on workload, driver behaviour and user acceptance*. Soesterberg, Niederlande: TNO Human Factors Research Institute.
- WICKENS, C. D. (1980) 'The structure of attentional resources', in NICKERSON, R.S. (Hrsg.) *Attention and performance 8*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum, S. 239-257.
- WILL, S. (2017). *Development of a presence model for driving simulators based on speed perception in a motorcycle riding simulator*. Doktorarbeit, Universität Würzburg, Deutschland.
- WITMER, B. G. & SINGER, M. J. (1994) *Measuring immersion in virtual environments*. (ARI Technical Report 1014). Alexandria, VA: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- WYNNE, R. A., BEANLAND, V., & SALMON, P. M. (2019). 'Systematic review of driving simulator validation studies'. *Safety science*, 117, 138-151.
- ZELTZER, D. (1992) 'Autonomy, interaction, and presence', *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Jg. 1, Nr. 1, S. 127-132, doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>.
- ZÖLLER, I. M. (2015) *Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerverhaltensvalidität*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

## 9 Abbildungsverzeichnis

- Bild 2-1: Darstellung des Zusammenhangs experimenteller Standardisierung und ökologischer Validität bezüglich der verwendeten Versuchsumgebung (aus dem Englischen nach PURUCKER ET AL., 2018: 432).15
- Bild 2-2: Schematische Darstellung des Übereinstimmungsgrads zwischen Realfahrt und Fahrsimulation (in Anlehnung an CAIRD & HORREY, 2011: 5-10, die Darstellung wurde hinsichtlich der relativen Validität und dem Vorliegen keiner Validität geändert).17
- Bild 2-3: Darstellung der Interaktion von technischem Aufbau des Simulators und des menschlichen Verhaltens.18
- Bild 4-1: Dynamischer „DESMORI“-Simulator (links), Honda NC700X mit Messtechnik (Mitte),24
- Bild 4-2: Honda NC700X (links); Detailaufnahme der Messtechnik im Helmloch (rechts).24
- Bild 4-3: Dynamischer DESMORI Motorradsimulator des WIVW.25
- Bild 4-4: Schematischer Aufbau der DESMORI IT-Umgebung26
- Bild 4-5: Statischer Motorradsimulator.26
- Bild 4-6: Links: Darstellung der Vorrichtung, die für den PDT verwendet wurde. Der rote Punkt stellt die Position dar, auf die die LED eingestellt wurde, um die Ergebnisse zwischen den Fahrern vergleichbar zu machen. Rechts: Taster am linken Lenkerende der HONDA NC700X, der für die Bestätigung der Signalwahrnehmung verwendet werden sollte.28
- Bild 4-7: Generische Darstellung der Befragung, die während des Versuchs durchgeführt wurde.29
- Bild 4-8: Zusammenstellung der Minimalszenarien zu Sequenzen.30
- Bild 4-9: Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus, der für die Studie im Rahmen des vorliegenden Arbeitspakets verwendet wird. Farblich hervorgehoben sind der Streckenbereich für die Sequenzen 1 und 2 (rot) und für die Sequenzen 3 und 4 (grün).30
- Bild 4-10: Bemaßte Skizze der ersten Sequenz.31
- Bild 4-11: Bemaßte Skizze der zweiten Sequenz.32
- Bild 4-12: Bemaßte Skizze der dritten Sequenz.32
- Bild 4-13: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke in Sequenz 1 (Anfahren, konstante Geradeausfahrt und Zielbremsung in den Stand). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die drei unterschiedlichen Zielgeschwindigkeiten: 50, 80 und 110 km/h und in den Spalten die drei Versuchsumgebungen. Die Gitterlinien stellen die Zielgeschwindigkeiten sowie die relevanten Start- und Endpunkte dar: Realfahrt, dynamischer Simulator und statischer Simulator.35
- Bild 4-14: Darstellung der mittleren Geschwindigkeit und deren Standardabweichung je Fahrer ID bei konstanter Geradeausfahrt.36
- Bild 4-15: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke in Sequenz 3 (Kurveeinleiten mit konstanter Geschwindigkeit und Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 40 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen, 40 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 50 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 50 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.37
- Bild 4-16: Mittlerer Rollwinkel und dessen Standardabweichung bei konstanter Geradeausfahrt je Fahrer.38
- Bild 4-17: Mittlerer Rollwinkel und dessen Standardabweichung beim Anfahren aus dem Stand je Fahrer.39
- Bild 4-18: Rollwinkelverläufe über die Strecke in Sequenz 3 (Kurveeinleiten mit konstanter Geschwindigkeit und Kurveausleiten mit konstanter Geschwindigkeit). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 40 km/h mit

- Fahrtrichtung Osten nach Westen, 40 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 50 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 50 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.<sup>40</sup>
- Bild 4-19: Rollwinkelverläufe über die Strecke in Sequenz 4 (Bremsung beim Einleiten der Kurve und Beschleunigung beim Ausleiten der Kurve). Die Darstellungen innerhalb der Matrix zeigen in den Zeilen die vier unterschiedlichen Bedingungen: 60 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen, 60 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten, 70 km/h mit Fahrtrichtung Osten nach Westen und 70 km/h mit Fahrtrichtung Westen nach Osten.<sup>41</sup>
- Bild 4-20: Geschätztes Leistungsdichtespektrum der Rollwinkelschwingungen bei Geradeausfahrt, getrennt nach Versuchsumgebung. Im Falle der dynamischen Simulation wird zusätzlich zum Gesamtleistungsdichtespektrum das Leistungsdichtespektrum für den Hexapoden dargestellt.<sup>42</sup>
- Bild 4-21: Exemplarischer Verlaufplot des Minimalszenarios konstante Geradeausfahrt. Dargestellt werden die Drosselklappenstellungen über die Differenz zur Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Versuchsumgebung. Mit der Raute wird der Startpunkt des dargestellten Regelungsverlaufs dargestellt; die Punktierungen deuten Zeitabstände von 1s an. Die Durchgezogenen Linien stellen die Regelung an der Drosselklappenstellung dar (via Gasdrehgriff). Bremseingriffe treten im dargestellten Beispiel nicht auf.<sup>44</sup>
- Bild 4-22: Exemplarischer Verlaufplot des Minimalszenarios Zielbremsung in den Stand. Dargestellt werden die Fahrereingaben für Drosselklappenstellung, Vorderradbremse und Hinterradbremse über die Differenz zur Zielgeschwindigkeit, getrennt nach Versuchsumgebung. Mit der Raute wird der Startpunkt des dargestellten Regelungsverlaufs dargestellt; die Punktierungen deuten Zeitabstände von 1s an. Die gepunkteten Linien stellen die Regelung an der Drosselklappenstellung dar (via Gasdrehgriff). Die durchgezogenen und durchbrochenen Linien stellen Bremsungen am Vorder- respektive Hinterrad dar.<sup>45</sup>
- Bild 4-23: Konstante Kurvenfahrt, Kurve 2, gefahren in West-Ost Richtung, Zielgeschwindigkeit: 40 km/h. Dargestellt werden die Trajektorie (Subplot a), die Streckenpositionen markanter Kurvenkennwerte (Subplot b) die gefahrene Geschwindigkeit (Subplot c), die Verläufe des Rollwinkels (Subplot d) und die Lenkwinkel und Lenkmomente (Subplot e).<sup>46</sup>
- Bild 4-24: Mittlere Bewertung zur erlebten Beanspruchung durch die Fahraufgabe getrennt nach Minimalszenarien und Versuchsumgebung<sup>47</sup>
- Bild 4-25: Mittlere Reaktionszeit auf den PDT und mittlere Fehlerrate getrennt nach Sequenz und Versuchsumgebung.<sup>48</sup>
- Bild 4-26: Mittlere Bewertung der Items „Wie realistisch war Ihr Gesamteindruck des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch war das Lenkverhalten des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch waren die Kräfte, die Sie zum Lenken aufbringen mussten?“ und „Wie gut konnten Sie der Fahrspur folgen?“ , aufgeteilt nach den Simulatoreausbaustufen statisch und dynamisch.<sup>50</sup>
- Bild 4-27: Mittlere Bewertung für die Fragen: „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?“, „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“, „Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?“ und „Wie gut konnten Sie das Motorrad in der virtuellen Realität bewegen oder manipulieren?“ , aufgeteilt nach den Simulatoreausbaustufen statisch und dynamisch.<sup>51</sup>
- Bild 4-28: Mittlere Bewertung der acht Items der Präsenzbefragung, aufgeteilt nach den Simulatoreausbaustufen statisch und dynamisch.<sup>51</sup>
- Bild 4-29: Mittlere Bewertung der Items „Stabilisierung des Fahrzeugs von 0-30 km/h“ (oben links), „Stabilisierung des Fahrzeugs von 30-60 km/h“ (oben rechts), „Stabilisierung des Fahrzeugs von 60-90 km/h“ (unten links) und „Stabilisierung des Fahrzeugs bei > 90 km/h“ (unten rechts), aufgeteilt nach den Simulatoreausbaustufen statisch und dynamisch.<sup>52</sup>
- Bild 4-30: subjektive Bewertung der beiden Simulationsumgebungen getrennt nach visueller und haptisch / propriozeptiver Rückmeldung.<sup>54</sup>

- Bild 4-31: Mittlere Bewertung der Fragen: "Die akustischen Rückmeldungen wirken realistisch" und "Die Lautstärke der akustischen Rückmeldungen ist...", aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.55
- Bild 5-1: Dynamischer DESMORI-Motorradsimulator (links), KTM 790 Duke mit Messtechnik (Mitte), statischer Motorradsimulator der WIVW GmbH (rechts).57
- Bild 5-2: KTM 790 Duke (links oben) mit Detailaufnahmen der Messtechnik.58
- Bild 5-3: Generisches Motorrad-HMI der WIVW GmbH.59
- Bild 5-4: Befragungsskalen der Probandenstudie.59
- Bild 5-5: Darstellung der Aufgabe „Ausweichen“. Der Fahrer beginnt an der „Start-Markierung“ mit der Fahraufgabe. Das Oval wird zunächst einmal vollständig durchfahren. In der zweiten Runde erscheint auf Höhe des schematischen Motorradlenkers die farbige Hervorhebung des Displays. Hierdurch wird dem Fahrer signalisiert, welche Pylonengasse durchfahren werden soll. Die Zielgeschwindigkeit für die gesamte Fahraufgabe beträgt 35 km/h.60
- Bild 5-6: Darstellung der Aufgabe „RSVP“. Die Aufgabe des Fahrers besteht darin, das dargestellte Oval zu durchfahren. Die Geschwindigkeit ist während der Aufgabe selbst (zwischen 30 und 40 km/h) zu wählen-und konstant zu halten. Während der Fahraufgabe besteht die Nebenaufgabe des Fahrers darin, den RSVP zu bearbeiten.61
- Bild 5-7: Versuchsstrecke im öffentlichen Straßenverkehr (© OpenStreetMap-Mitwirkende).62
- Bild 5-8: Darstellung der gefahrenen Trajektorie für die Aufgabe Ausweichen, getrennt nach Umgebung (v.l.n.r.: Realfahrt, dynamische Simulation, statische Simulation) und Ausweichrichtung (v.o.n.u.: links, geradeaus, rechts). Darunter die über das Probandenpanel gemittelten Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung.64
- Bild 5-9: Darstellung der gefahrenen Trajektorie für die Aufgabe Ausweichen und Bremsen, getrennt nach Umgebung (v.l.n.r.: Realfahrt, dynamische Simulation, statische Simulation) und Ausweichrichtung (v.o.n.u.: links, geradeaus, rechts). Darunter die über das Probandenpanel gemittelten Verläufe von Rollwinkel und Geschwindigkeit sowie deren Standardabweichung.65
- Bild 5-10: tanh-Curve Fitting des Ausweich- und Bremsmanövers anhand einer Beispielfahrt (links) und über alle Fahrer und Versuchsbedingungen (rechts).66
- Bild 5-11: tanh-Curve Fitting des Ausweichmanövers anhand einer Beispielfahrt (links) und über alle Fahrer und Versuchsbedingungen (rechts).67
- Bild 5-12: Mittlere Bewertung der Aufgabenerfüllung für die Aufgabe Ausweichen (links) und die Aufgabe Ausweichen und Bremsen (rechts).68
- Bild 5-13: Boxplot der Erfolgsrate bei der Reaktion auf den RSVP getrennt nach den Versuchsumgebungen.69
- Bild 5-14: Boxplot der Reaktionszeit auf den RSVP. Dargestellt werden die Bedienung während der Fahrt (links), die Bedienung während der Fahrt gegen den Uhrzeigersinn (Mitte) und die Bedienung während der Fahrt im Uhrzeigersinn (rechts), getrennt nach den Versuchsumgebungen.70
- Bild 5-15: Mittlere Geschwindigkeitsänderung nach Beginn der Nebenaufgabenbedienung, getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung. Die punktierten Linien und transparenten Balken zeigen Mediane respektive Standardabweichungen der gesamten Stichprobe je Umgebung, unabhängig von der Fahrtrichtung.71
- Bild 5-16: Fahrtverläufe der Referenzstrecke. Dargestellt wird eine Draufsicht der Route mit Bemaßung für Hin- und Rückweg, so wie die Fahrtverläufe aller Fahrer getrennt nach Hin- und Rückfahrt (linke, bzw. rechte Spalte) und Umgebung (v.o.n.u.: Realfahrt, dynamische Motorradsimulation, statische Motorradsimulation).73
- Bild 5-17: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit im Verlauf der Kurve in der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung.74
- Bild 5-18: Mittelwert und Standardabweichung des Rollwinkels im Verlauf der Kurve in der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Getrennt nach Fahrtrichtung und Versuchsumgebung.75

- Bild 5-19: Mittlere Bewertung der Items „Wie realistisch war Ihr Gesamteindruck des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch war das Lenkverhalten des Fahrsimulators?“, „Wie realistisch waren die Kräfte, die Sie zum Lenken aufbringen mussten?“ und „Wie gut konnten Sie der Fahrspur folgen?“ , aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.76
- Bild 5-20: Mittlere Bewertung für die Fragen: „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?“, „Wie stark stimmte Ihre Erfahrung in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?“, „Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung visuell zu überblicken oder zu untersuchen?“ und „Wie gut konnten Sie das Motorrad in der virtuellen Realität bewegen oder manipulieren?“, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.77
- Bild 5-21: Mittlere Bewertung der acht Items der Präsenzbefragung, aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.78
- Bild 5-22: Mittlere Bewertung der Fragen: "Die akustischen Rückmeldungen wirken realistisch" und "Die Lautstärke der akustischen Rückmeldungen ist...", aufgeteilt nach den Simulatorebaustufen statisch und dynamisch.78
- Bild 7-1: Entscheidungsbaum zur Auswahl einer Untersuchungsumgebung.85

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht der identifizierten Minimalszenarien.22

Tabelle 4-1: Überblick der fahrdynamischen Messgrößen, die im Rahmen des Projekts herangezogen wurden.27

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der unterschiedlichen Versuchsbedingungen je Sequenz.33

# 11 Anhang

## 11.1 Nachbefragung

BASt Anwendungsmöglichkeiten Motorradsimulatoren

### Nachbefragung



Datum: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ V-Umgebung: \_\_\_\_\_ VL: \_\_\_\_\_

1. Wie realistisch war das **Lenkverhalten** Simulators, im Vergleich zu einer realen Motorradfahrt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			gut			sehr gut		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

2. Wie gut konnten Sie der **Fahrspur** folgen?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			gut			sehr gut		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

3. Wie realistisch war Ihr **Gesamteindruck** des Fahrersimulators?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			gut			sehr gut		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

4. Wie realistisch waren die **Kräfte**, die Sie zum Lenken aufbringen mussten, im Vergleich zu einer realen Motorradfahrt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			gut			sehr gut		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

#### **Fahrerlebnis im Simulator:**

Bitte geben Sie im Folgenden eine Gesamteinschätzung zum Simulator ab. Dabei gibt es keine richtigen oder falschen Aussagen. Es zählt lediglich Ihr Erleben der Situation.

1. Wie **natürlich** erschien Ihnen die Interaktion mit der Umgebung?

1	2	3	4	5	6	7
sehr unnatürlich			weder noch			sehr natürlich

2. Wie stark stimmte Ihre **Erfahrung** in der virtuellen Realität mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?

1	2	3	4	5	6	7
sehr wenig			weder noch			sehr stark

BASt Anwendungsmöglichkeiten Motorradsimulatoren

## Nachbefragung



Datum: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ V-Umgebung: \_\_\_\_\_ VL: \_\_\_\_\_

3. Wie gut waren Sie in der Lage, die Umgebung **visuell** zu überblicken oder zu untersuchen?

1	2	3	4	5	6	7
sehr schlecht			weder noch			sehr gut

4. Wie gut konnten Sie **das Motorrad** in der virtuellen Realität **bewegen** oder manipulieren?

1	2	3	4	5	6	7
sehr schlecht			weder noch			sehr gut

*Bitte geben Sie an, in wie weit Sie diesen Aussagen zustimmen oder sie ablehnen.*

5. Während der Simulation war die durch Sie erschaffene Welt **realer** oder **präsender** als die reale Welt.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

6. Ich hatte das Gefühl, in dem **virtuellen Raum** zu sein.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

7. Ich empfand die Situation als **albern**.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

8. Mein **Wille**, die mir in der virtuellen Welt gestellten Aufgaben zu meistern, war so stark wie im realen Leben.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

9. Ich konnte mir den virtuellen Raum **vorstellen**.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

BASt Anwendungsmöglichkeiten Motorradsimulatoren

**Nachbefragung**



Datum: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ V-Umgebung: \_\_\_\_\_ VL: \_\_\_\_\_

10. Während der Simulation war mein **Bewusstsein** im realen Raum, nicht in der Welt, die die Simulation erschuf.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

11. Ich hatte das Gefühl, nur **Bilder** zu sehen.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

12. Ich vergaß, dass noch **andere Personen** im Raum anwesend waren.

1	2	3	4	5	6	7
lehne ab			weder noch			stimme zu

Akustische Rückmeldungen

Die **akustischen** Rückmeldungen wirken **realistisch**

-3	-2	-1	0	1	2	3
lehne ab			weder noch			stimme zu

Bei **Antworten ≤ 0**: welche Rückmeldungen haben **nicht** **realistisch** gewirkt (z.B. Motordrehzahl, Abrollgeräusche, Windgeräusche...)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Die **Lautstärke** der **akustischen** Rückmeldungen ist

-3	-2	-1	0	1	2	3
Zu gering			Genau richtig			Zu hoch

BASt Anwendungsmöglichkeiten Motorradsimulatoren

## Nachbefragung



Datum: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ V-Umgebung: \_\_\_\_\_ VL: \_\_\_\_\_

Zum Abschluss möchten wir Sie bitten den Simulator insgesamt bezüglich der Darstellung unterschiedlicher Reize **im Vergleich zur Fahrt** mit einem realen Motorrad zu bewerten.

**Visuell** - Fahrdynamik

... wahrgenommen	schwächer						stärker	Nicht bewertbar
Geschwindigkeit	<input type="checkbox"/>							
Beschleunigung	<input type="checkbox"/>							
Verzögerung	<input type="checkbox"/>							
Nickwinkel	<input type="checkbox"/>							
Rollwinkel	<input type="checkbox"/>							
Gierwinkel	<input type="checkbox"/>							

**Haptisch** / propriozeptiv

... wahrgenommen	Geringer						Höher	Nicht bewertbar
Nickwinkel	<input type="checkbox"/>							
Rollwinkel	<input type="checkbox"/>							
Gierwinkel	<input type="checkbox"/>							
Lenkmoment	<input type="checkbox"/>							
Geschwindigkeit	<input type="checkbox"/>							
Längsbeschleunigung	<input type="checkbox"/>							
Längsverzögerung	<input type="checkbox"/>							
Querschleunigung	<input type="checkbox"/>							
Lenkwinkel	<input type="checkbox"/>							
Lenkerdämpfung	<input type="checkbox"/>							
Stabilisierung des Fahrzeugs 0-30 km/h	<input type="checkbox"/>							
Stabilisierung des Fahrzeugs 30-60 km/h	<input type="checkbox"/>							
Stabilisierung des Fahrzeugs 60-90 km/h	<input type="checkbox"/>							
Eigenstabilisierung des Fzgs. > 90 km/h	<input type="checkbox"/>							
Kurvenstabilität	<input type="checkbox"/>							

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Mensch und Sicherheit“

## 2018

- M 277: **Unfallgeschehen schwerer Güterkraftfahrzeuge**  
Panwinkler € 18,50
- M 278: **Alternative Antriebstechnologien: Marktdurchdringung und Konsequenzen für die Straßenverkehrssicherheit**  
Schleh, Bierbach, Piasecki, Pöppel-Decker, Schönebeck  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 279: **Psychologische Aspekte des Einsatzes von Lang-Lkw – Zweite Erhebungsphase**  
Glaser, Glaser, Schmid, Waschulewski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 280: **Entwicklung der Fahr- und Verkehrskompetenz mit zunehmender Fahrerfahrung**  
Jürgensohn, Böhm, Gardas, Stephani € 19,50
- M 281: **Rad-Schulwegpläne in Baden-Württemberg – Begleitevaluation zu deren Erstellung mithilfe des WebGIS-Tools**  
Neumann-Opitz € 16,50
- M 282: **Fahrverhaltensbeobachtung mit Senioren im Fahrsimulator der BAST Machbarkeitsstudie**  
Schumacher, Schubert € 15,50
- M 283: **Demografischer Wandel – Kenntnisstand und Maßnahmenempfehlungen zur Sicherung der Mobilität älterer Verkehrsteilnehmer**  
Schubert, Gräcmann, Bartmann € 18,50
- M 284: **Fahranfängerbefragung 2014: 17-jährige Teilnehmer und 18-jährige Nichtteilnehmer am Begleiteten Fahren – Ansatzpunkte zur Optimierung des Maßnahmenansatzes „Begleitetes Fahren ab 17“**  
Funk, Schrauth € 15,50
- M 285: **Seniorinnen und Senioren im Straßenverkehr – Bedarfsanalysen im Kontext von Lebenslagen, Lebensstilen und verkehrssicherheitsrelevanten Erwartungen**  
Holte € 20,50
- M 286: **Evaluation des Modellversuchs AM 15**  
Teil 1: **Verkehrsbewährungsstudie**  
Kühne, Dombrowski  
Teil 2: **Befragungsstudie**  
Funk, Schrauth, Roßnagel € 29,00
- M 287: **Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Pkw-Fahrern**  
Kathmann, Scotti, Huemer, Mennecke, Vollrath  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 288: **Anforderungen an die Evaluation der Kurse zur Wiederherstellung der Kraftfahreignung gemäß § 70 FeV**  
Klipp, Brieler, Frenzel, Kühne, Hundertmark, Kollbach, Labitzke, Uhle, Albrecht, Buchardt € 14,50

## 2019

- M 289: **Entwicklung und Überprüfung eines Instruments zur kontinuierlichen Erfassung des Verkehrsklimas**  
Schade, Rößger, Schlag, Follmer, Eggs  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 290: **Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17 – Analyse des Leistungsniveaus im Rettungsdienst für die Jahre 2016 und 2017**  
Schmiedel, Behrendt € 18,50
- M 291: **Versorgung psychischer Unfallfolgen**  
Auerbach, Surges € 15,50
- M 292: **Einfluss gleichaltriger Bezugspersonen (Peers) auf das Mobilitäts- und Fahrverhalten junger Fahrerinnen und Fahrer**  
Baumann, Geber, Klimmt, Czerwinski € 18,00
- M 293: **Fahranfänger – Weiterführende Maßnahmen nach dem Fahrerlaubniswerb – Abschlussbericht**  
Projektgruppe „Hochrisikophase Fahranfänger“ € 17,50

## 2020

- M 294: **Förderung eigenständiger Mobilität von Erwachsenen mit geistiger Behinderung**  
Markowetz, Wolf, Schwaferts, Luginger, Mayer, Rosin, Buchberger  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 295: **Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitsystemen in Pkw 2017**  
Gruschwitz, Hölscher, Raudszus, Schulz € 14,50
- M 296: **Leichte Sprache in der theoretischen Fahrerlaubnisprüfung**  
Schrauth, Zielinski, Mederer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 297: **Häufigkeit von Ablenkung beim Autofahren**  
Kreuzlein, Schleinitz, Krems € 17,50
- M 298: **Zahlungsbereitschaft für Verkehrssicherheit**  
Obermeyer, Hirte, Korneli, Schade, Frießel € 18,00
- M 299: **Systematische Untersuchung sicherheitsrelevanter Fußgängerhaltens**  
Schüller, Niestegge, Roßmerkel, Schade, Rößger, Rehberg, Maier € 24,50
- M 300: **Nutzungshäufigkeit von Smartphones durch Pkw-Fahrer Erhebung 2019**  
Kathmann, Johannsen, von Heel, Hermes, Vollrath, Huemer € 18,00
- M 301: **Motorräder – Mobilitätsstrukturen und Expositionsgrößen**  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer € 16,00
- M 302: **Zielgruppengerechte Ansprache in der Verkehrssicherheitskommunikation über Influencer in den sozialen Medien**  
Duckwitz, Funk, Schliebs, Hermanns € 22,00
- M 303: **Kognitive Störungen und Verkehrssicherheit**  
Surges  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- M 305: **Re-Evaluation des Alkoholverbots für Fahranfängerinnen und Fahranfänger**  
Evers, Straßgütel € 15,50

### AKTUALISIERTE NEUAUFLAGE VON:

- M 115: **Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung – gültig ab 31.12.2019**  
Gräcmann, Albrecht € 17,50

## 2021

### M 304: **Zum Unfallgeschehen von Motorrädern**

Pöppel-Decker

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

### M 306: **Stand der Wissenschaft: Kinder im Straßenverkehr**

Schmidt, Funk, Duderstadt, Schreiter, Sinner, Bahlmann

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

### M 307: **Evaluation des Zielgruppenprogramms „Aktion junge Fahrer“ (DVW) – Phase II**

Funk, Rossnagel, Bender, Barth, Bochert, Detert, Erhardt, Hellwagner, Hummel, Karg, Kondrasch, Schubert, Zens

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

### M 308: **Evaluation der Zielgruppenprogramme „Kind und Verkehr“ (DVR, DVW) und „Kinder im Straßenverkehr“ (DVW) – Phase II**

Funk, Bender, Rossnagel, Barth, Bochert, Detert, Erhardt, Hellwagner, Hummel, Karg, Kondrasch, Schubert, Zensen

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

### M 309: **Entwicklung und Evaluation effizienter Trainingsmaßnahmen für ältere Verkehrsteilnehmer zur Förderung ihrer Fahrkompetenz**

Schoch, Julier, Kenntner-Mabiala, Kaussner

€ 16,00

### M 310: **Erfassung der subjektiven Wahrnehmung und Bewertung verkehrssicherheitsrelevanter Leistungsmerkmale und Verhaltensweisen älterer Autofahrer – Entwicklung und Prüfung eines Selbsttests**

Horn

€ 18,50

### M 311: **Safety Performance Indicators im Straßenverkehr – Überblick und Erfahrungen aus der internationalen Praxis**

Funk, Orłowski, Braun, Rücker

€ 20,50

### M 312: **Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Radfahrern und Fußgängern**

Funk, Roßnagel, Maier, Crvelin, Kurz, Mohamed, Ott, Stamer, Stößel, Tomaselli

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

### M 313: **Analyse der Merkmale und des Unfallgeschehens von Pedelecfahrern**

Platho, Horn, Jänsch, Johannsen

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

### M 314: **SENIORWALK**

Holte

€ 19,00

### M 315: **Untersuchungen zur wissenschaftlichen Begleitung des reformierten Fahrlehrerrechts**

Bredow, Ewald, Thüs, Malone, Brünken

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

### M 316: **VERKEHRSKLIMA 2020**

Holte

€ 16,50

### M 317: **Alternative Antriebstechnologien – Marktdurchdringung und Konsequenzen für die Straßenverkehrssicherheit**

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 318: **Verkehrssicherheitsberatung älterer Kraftfahrerinnen und -fahrer in der hausärztlichen Praxis – Bestandsaufnahme**

Schoch, Kenntner-Mabiala

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

### M 319: **Protanopie und Protanomalie bei Berufskraftfahrern und Berufskraftfahrerinnen – Prävalenz und Unfallrisiko**

Friedrichs, Schmidt, Schmidt

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

### M 320: **Eignung von Fahrsimulatoren für die Untersuchung der Fahrkompetenz älterer Autofahrer**

Maag, Kenntner-Mabiala, Kaussner, Hoffmann, Ebert

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

### M 321: **Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung der Determinanten der Routenwahl von Radfahrern**

Lux, Schleinitz

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

### M 323: **Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren**

Hammer, Pleß, Will, Neukum, Merkel

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

## 2022

### M 322: **Zum Unfallgeschehen von Motorrädern**

Duckwitz, Hielscher, Schröder, Funk, Schrauth, Fischer, Schnabel, Veigl

in Vorbereitung

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](http://www.schuenemann-verlag.de)

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