

Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der experimentellen Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 337

bast

Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der experimentellen Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung

von

Christina Platho
Silvio Tristram
Stefan Kupschick

HFC Human-Factors-Consult GmbH
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 337

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 82.0748
Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der experimentellen Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung

Betreuung
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

ISSN 0943-9315
ISBN 978-3-95606-725-9

Bergisch Gladbach, März 2023

Kurzfassung – Abstract

Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der experimentellen Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung

Die Gewährleistung einer nachhaltigen und sicheren Mobilität für alle Verkehrsteilnehmer ist eine wichtige gesellschaftspolitische Aufgabe. Studien in der virtuellen Realität (kurz: VR) haben sich in den vergangenen Jahren als Instrument der experimentellen Verkehrsforschung etabliert. Als Voraussetzung für die Aussagekraft ihrer Ergebnisse gilt die Realitätsnähe oder Immersion der virtuellen Erfahrung. Hier versprechen VR-Brillen ein immersiveres Erleben der virtuellen Welt als klassische bildschirm- oder projektionsbasierte Simulatoren. Im Verbund mit zusätzlichen VR-Komponenten ermöglichen sie es, sich durch virtuelle Welten zu bewegen und mit (virtuellen) Objekten und Personen zu interagieren. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Zusammenstellung der oftmals für unterhaltungsbezogene Zwecke entwickelten VR-Komponenten sich für den Einsatz als Forschungsinstrument bestmöglich eignet. Insbesondere zur Untersuchung von Fußgängerverhalten wäre ein valides Forschungsinstrument von Nutzen, wie es der bereits etablierte klassische Fahrsimulator zur Untersuchung des Fahrverhaltens von Pkw-Fahrern ist.

Ziel des vorliegenden Projekts war daher, die Anforderungen an ein VR-System (d. h. an den Verbund von VR-Komponenten), zur Untersuchung von Fußgängerverhalten zu definieren und konkrete Empfehlungen zum Aufbau eines brillenbasierten VR-Systems zur Untersuchung der Fußgängersicherheit und -mobilität zu geben. In einer Literatur- und Marktübersicht wurde die Verbindung zwischen den Eigenschaften von VR-Komponenten (z. B. Displaymerkmale, Trackingmethoden u. a.) und der Erlebnisqualität der virtuellen Erfahrung aufgezeigt (z. B. Genauigkeit des Trackings, Realitätsnähe der visuellen Darstellung u. a.). Anschließend wurden zentrale Anforderungen an ein VR-Systeme, die in der verhaltenswissenschaftlichen Forschung eingesetzt werden sollen, definiert. Daraus entstand ein Kriterienkatalog, der in sechs Dimensionen (Realitätsnähe, Beeinträchtigungsfreiheit, Datenverfügbarkeit und -güte, Verwendbarkeit für unterschiedliche Einsatzzwecke, Versuchsökonomie und (Daten-)Sicherheit) die Kernanforderungen an ein VR-System beschreibt. Auf Basis einer Literaturü-

bersicht wurden die bislang mit VR-Systemen untersuchten Anwendungsfälle (bei Fußgängern v. a. Querungsszenarien auf begrenztem Raum) und deren technische Umsetzung beschrieben.

Zur Identifikation eines VR-Systems, das sich zur Untersuchung von Fußgängerverhalten auch in größeren virtuellen Welten eignet, wurden Interviews mit VR-Experten (N = 11) geführt. Anhand zweier Beispielszenarien skizzierten die Experten das aus ihrem Erfahrungshintergrund jeweils geeignetste VR-System und bewerteten, inwieweit es die eingangs definierten Kriterien erfüllt. Aus den Befragungsergebnissen lassen sich drei unterschiedliche Systemvarianten ableiten, die sich in ihren Merkmalsprofilen teils erheblich unterscheiden:

- 1) Ein autarkes, ortsungebunden einsetzbares und preisgünstiges System, das jedoch hinsichtlich der Genauigkeit des Systems und der visuellen Erlebnisqualität – insbesondere der Größe des Sichtfelds – hinter den beiden Alternativen zurückbleibt.
- 2) Ein laborgebundenes System, das im Gegensatz zu den beiden anderen Systemvarianten, die eine natürliche Fortbewegung ermöglichen, auf eine vermittelte Fortbewegung setzt, dafür jedoch den Platzbedarf auf normale Raumgröße begrenzt hält.
- 3) Ein High Fidelity-System, das die Natürlichkeit der Fortbewegung mit einer hohen visuellen Erlebnisqualität vereint, dafür jedoch auch nicht leicht zu realisieren ist (Platzbedarf, Kosten, Aufwand).

Anhand einer Übersicht über zentrale Forschungsthemen im Bereich der Fußgängersicherheit und -mobilität wurden die Einsatzmöglichkeiten dieser drei VR-Systeme erörtert. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse lässt sich die für den eigenen Einsatzzweck und die vorliegenden Rahmenbedingungen geeignete Systemvariante bestimmen. Abschließend werden mögliche Entwicklungen der kommenden Jahre im Bereich VR prognostiziert und die damit verbundenen Implikationen für die Ergebnisse des vorliegenden Projekts aufgezeigt.

Possible applications of VR headsets in experimental road safety and mobility research

Ensuring sustainable and safe mobility for all road users is an important socio-political task. Studies in virtual reality (VR) have been established as an important tool in experimental traffic research. The validity of their results depends on the realism or immersion of the virtual experience. VR headsets promise a more immersive experience of the virtual world than classic screen- or projection-based simulators. In combination with additional VR components they enable users to move through virtual worlds and to interact with (virtual) objects and people. However, the question arises which combination of VR components, which oftentimes were developed for entertainment-related purposes originally, is most suitable for use as a research tool. Such a valid research tool is especially needed for examining pedestrian behavior, as there is no research tool for this type of behaviour as comparably established as the driving simulator is for studying car drivers' behavior.

The aim of the present project was to define the requirements for a VR system (i.e., the combination of VR components), for the study of pedestrian behavior, and to provide actionable recommendations for a VR system using VR headsets for the study of pedestrian safety and mobility.

A literature and market review was conducted to show the link between the characteristics of VR components (e.g., display features, tracking methods, etc.) and the quality of the virtual experience (e.g. tracking accuracy, realism of visual image, etc.). From this overview requirements for a research instrument were derived. This resulted in a catalogue of criteria that summarizes the main requirements for a VR system in six dimensions (realism, tolerability, data availability and accuracy, universal applicability, experimental economy, and data privacy & safety). Based on a literature review, the research topics investigated so far with VR systems (for pedestrians mainly crossing scenarios in confined spaces) and their technical implementation were described.

To identify a VR system that would allow to study pedestrian behaviour in larger virtual worlds, interviews with VR experts (N = 11) were conducted. For each of two scenarios described to demonstrate possible research questions, the experts outlined the most suitable VR system and assessed the extent to which it met the criteria defined. Three

types of systems can be derived from the interviews, which differ in the choice of VR components and the feature profiles associated therewith.

- 1) A stand-alone, location-independent system that is inexpensive, but offers a lower accuracy and a restricted quality of virtual experience – especially with respect to the size of the field of view – than both of the other systems.
- 2) A laboratory-based system that in contrast to the other two systems, relies on mediated instead of natural locomotion, but thereby manages to limit spatial requirements to normal room size.
- 3) A high fidelity system that offers both a high quality of virtual experience and natural walking, but is challenging to implement due to demand for space, costs and effort.

Based on an overview of important research topics in the field of pedestrian safety and mobility, the scope of applications of these three VR systems was discussed. The overall assessment of the three VR systems assists in choosing the suitable VR system according to the intended purpose and capacity of the respective research institute. Finally, future developments in the field of VR are predicted and possible implications for the results of the present project are pointed out.

Summary

Possible applications of VR headsets in experimental road safety and mobility research

1. Objective

Ensuring sustainable and safe mobility for all road users is an important socio-political task. Studies in virtual reality (VR) have been established as an important tool in experimental traffic research. The validity of their results depends on the realism or immersion of the virtual experience. VR headsets promise a more immersive experience of the virtual world than traditional screen- or projection-based simulators. In combination with additional VR components, they enable users to move through virtual worlds and interact with (virtual) objects and people. However, the question arises which combination of VR components, which oftentimes were developed with entertainment-related purposes in mind, is most suitable for use as a research tool. Such a valid research tool is especially needed for examining pedestrian behavior, as there is no research tool for this type of behavior as comparably established as the driving simulator is for examining car drivers' behavior.

The aim of this project was therefore to define the requirements for a VR system (i.e., a composite of VR components for implementing the virtual experience) used in behavioral studies. In order to guarantee a sufficient level of detail, this should be done with regard to a selected group of road users. Due to the low prevalence of simulation environments for examining pedestrian behavior and the special research interest in the optimal implementation of locomotion in the virtual world that is not mediated in the real world (via steering wheel/handlebar, pedals, etc.), the focus was placed on pedestrians. Based on these previously defined requirements, recommendations for the implementation of a VR system for examining pedestrian behavior were to be derived, and its possibilities and limitations were to be discussed also with regard to future developments.

2. Procedure

To achieve the project goal, a literature review of key aspects of virtual experience (immersion, presence, cybersickness, etc.) was conducted and the

characteristics of a VR system that affect the quality of experience were described. In the following market survey, the characteristics of currently available VR components were specified. An overview of the VR systems for pedestrians and car drivers that have been implemented in traffic-related research in the past years was given in order to derive recommendations for the project. While this literature and market synopsis included studies with pedestrians and car drivers equally, the following work focused on the application case of pedestrian simulation. The validity-related and economic requirements for a VR system used for behavioral research were identified and summarized in a criteria catalog that defines the requirements for a VR system used to examine pedestrian behavior.

Interviews with eleven VR experts from different domains were conducted, who described the most suitable VR system based on these requirements for both of the two example scenarios given. Both examples – a crossing scenario with free choice of crossing point and an inner-city route selection scenario – require a more extensive walk-through of the virtual world than implemented in previous pedestrian studies. The interviews focussed on the selection of hardware components for visualization (VR headsets), the implementation of a simple body tracking system to capture and visualize evasive movements of the test subjects, and the locomotion technology used.

The advantages and disadvantages of the suggested VR system were described in comparison with possible alternatives. Furthermore, with regard to the possible applications of the VR system, experiences with eye-tracking, the integration of elderly people and possibilities for enabling smartphone use in VR were addressed in the interviews, as well as forecasts on technical developments in the next two to three years. An overview of key research topics in the area of pedestrian safety and mobility behavior was then developed, and the suitability of the three systems derived from the expert interviews for investigating these research topics was discussed. Subsequently, three different types of systems were identified in these interviews. These were described and assessed with regard to their applicability for answering possible research topics in the field of pedestrian safety and mobility behavior. In the outlook, technical developments in the years to come (based on the forecasts of the VR experts) and their possible relevance for choosing between the three types of systems are pointed out.

3. Results

The main results of the present project are the criteria catalog and the results of the expert interviews. The criteria catalog guides the development of the most suitable VR system and provides the basis for evaluating its advantages and disadvantages in this project. It can also be used for the evaluation of new technical developments in the future. The results of the expert interviews include the most relevant criteria for selecting VR components, the three types of systems that can be derived from them as well as their evaluation according to the criteria catalog. Finally, first experiences with special use cases for traffic-related research in VR (eye-tracking, experiments with the elderly, smartphone use) are described.

Criteria catalog:

The criteria catalog summarizes the requirements for a VR system that is to be used in pedestrian behavioral research. 19 requirements (i. e. criteria) are grouped into the following six higher-order dimensions:

- **Realism:** describes the realistic representation and fidelity of sensory perception and possibility of action in the virtual world.
- **Tolerability:** describes the absence of undesirable side effects of system use that impair the quality of the virtual experience (e. g. cybersickness) and thus possibly also the validity of the data.
- **Availability and accuracy of data:** describes the extent to which the tracking data and the data required to interpret the behavioral measures are robust and accurate.
- **Universal applicability:** describes the necessary requirements for using the VR system for different research topics. It also includes accessibility for older and inexperienced VR users.
- **(Experimental) economy:** describes the time or financial effort required to set up and use the VR system.
- **Data privacy and safety:** defines the privacy of data and physical integrity of system use.

Main reasons for the selection of VR components:

The experts' decisions about the most suitable VR system can be summarized as follows:

- Two different but among the experts equally preferred approaches emerge when deciding on the VR system: 1) the preference for freedom of movement (important for natural locomotion), which is made possible by self-sufficient VR headsets that do not depend on connection to a computer and external tracking devices, and 2) the decision for a higher visual experience quality and a more accurate tracking by using wired VR headsets.
- Significant criteria for the selection of VR headsets are the visual experience quality, especially a high resolution and a large Field of View (FOV), the tracking quality (differences between different stand-alone VR headsets were reported), a reliable performance and the option for wireless use of wired VR headsets, which is implemented in only few wired headsets so far.
- Natural walking is unanimously preferred for locomotion in the virtual world. Mediated locomotion techniques are only second-choice options if natural locomotion cannot be implemented (mainly due to limitations in available space). The redirected walking technique, which tricks users into walking in a large circle in the real world while seemingly walking a straight line in the virtual world, could be regarded as acceptable substitute for natural walking, however, it still requires plenty of space ($\emptyset \sim 20$ m) as well as effort and expertise to implement.
- There are different preferences when deciding on the second-best locomotion technique if natural walking is not possible. The following techniques were mentioned: controllers, imitations of walking movements on the spot via sensor-equipped VR-shoes, and simple treadmills. Since even high-priced treadmills do not enable natural movement, they were not considered further by the experts due to the suboptimal cost-benefit ratio.
- Most experts prefer a simple but accurate tracking solution that works within the well-established lighthouse tracking system, which is used by wired headsets for tracking the position of the VR headset. Stations (,lighthouses') that are installed in the room emit infrared signals, which can be used by both the VR headset and trackers attached to the body to locate the position of the user. Body tracking involves attaching one tracker to each of the feet, arms,

and the hip. Using inverted kinematics, the movements of the entire body can be accurately inferred from these few measurement points. Alternatively, a simple body model can also be determined only based on head movements gained from a stand-alone headset or additionally via sensors attached to the feet, e. g. when using sensor-equipped VR-shoes.

Description of the different systems:

Three types of VR systems with different advantages and disadvantages could be derived from the interviews. These are:

- 1) A stand-alone, location-independent and inexpensive system, which, however, lags behind the two alternatives in terms of tracking accuracy and quality of visual experience – especially with regard to the limited size of the FOV.
- 2) A laboratory-based system that relies on mediated locomotion (in contrast to the other two system alternatives, which allow natural walking), but offers a high quality of visual experience and can be set up in a room of normal size.
- 3) A high fidelity system, which combines natural walking with a high quality of visual experience, but is challenging to implement (expensive, plenty of space needed).

The three types of systems are described in table 1.

	Stand-alone system	Laboratory-based system	High-fidelity system
Headset	Stand-alone headset	Wired headset with a large FOV	Wired headset with a large FOV
Locomotion	Natural walking	Sensor-equipped VR-shoes	Natural walking
	Alternative: Redirected walking	Alternatives: Treadmills Natural walking in small virtual worlds	Alternative: Redirected walking
Tracking	Stand-alone	Lighthouse tracking (ca. 4 devices)	Lighthouse tracking (8 – 16 devices)
Displaying body movements	Simple head-based model	Model based on head and feet tracking	Tracker (hands, feet, hip) and inverse kinematics

Tab. 1: Description of the three types of systems

The following recommendations for the selection of VR headsets and mediated locomotion technology are mainly based on the evaluation of the experts. They were specified by the authors of this report, who gave particular importance to certain characteristics (e.g. FOV, accessibility). The FOV is important in traffic-related studies where the perceptibility of peripheral information can influence the behavior being observed. Since various research topics place this requirement on a VR system, VR headsets with a FOV as close as possible to the human FOV should be selected. If possible, the VR headset should be expandable with an eye tracking module. Since the FOV is still very limited in all currently available stand-alone VR headsets, the FOV is so far no selection criterion for stand-alone VR headsets. However, since the experts' recommendations for autonomous VR headsets are very model-specific, they cannot be translated into generic recommendations that can be derived from the specifications of the headsets. Since the limitation of the available tracking area (the so-called play area) of stand-alone VR headsets as reported by the manufacturer could not easily be removed in initial practical trials, the manufacturers' specifications on the size of this play area should not be disregarded. This is especially true if there are no proof-of-concepts known for the desired stand-alone headset that prove its practical applicability beyond the limits of the play area as specified by the manufacturer.

As a mediated locomotion technique (required for system variant 2), sensor-equipped VR-shoes, which capture the step movements performed while sitting on a swivel chair, are preferred. They are less susceptible to cybersickness and more accessible for VR or gaming-inexperienced subjects than VR controllers. Compared to treadmills used in gaming, they are cheaper and promise more precise step measurements.

Evaluation of the three types of systems:

The three types of systems differ in their advantages and disadvantages. A summary of the evaluation of the system variants is shown in Table 2. The stand-alone system allows for natural locomotion without a restrictive cable and works without being connected to a computer or external devices for tracking. However, compared to the two wired systems, it is less powerful, so the quality of visual experience is lower and tracking performance is less accurate. The practical significance of this lower tracking accuracy is still disputed. The

	Stand-alone system	Laboratory-based system	High fidelity system
Realism	Limited quality of visual experience	Natural walking only in small virtual worlds possible	High
Tolerability	High	Cybersickness	Weight of wireless adapter/backpack
Accuracy	Limited	High	High
Universal applicability	Limited due to reduced FOV	Limited due to mediated locomotion technique	High
(Experimental) economy	Low costs of acquisition Location-independent, requires a sufficiently large room for conducting tests High level of expertise to implement redirected walking	Lower space requirements Higher costs for acquisition	Higher costs for acquisition High space requirements High level of expertise necessary to implement redirected walking
Data privacy and safety	Safety measures for critical scenarios Possible privacy issues avoidable	High	Safety measures for critical scenarios

Table 2: Comparison of the three systems based on the dimension of the criteria catalog

applicability of the system is mainly limited by the reduced FOV. As a location-independent system that does not rely on external equipment installed in the room (in contrast to the two wired systems), the experimental location can be freely chosen. In addition, the buying price for this stand-alone system is much lower than for both wired systems. Any data privacy issues can be resolved, if necessary, by opting for the more expensive business edition of the VR headset. The VR system does not pose an inherent safety risk. However, since the test subjects are encouraged to move naturally in the room while being isolated from the outside world via the headset, additional safety mechanisms should be implemented for critical scenarios (e.g. when building fake steps in the real world to mimic curbs in the virtual world), or when vulnerable test subjects are involved, who might be provided with the possibility of holding on to a solid object that is also visible in the virtual world.

The laboratory-based system offers an approximately realistic FOV and can be set up in a room of normal size. However, natural movement is only possible in small virtual worlds. In larger worlds, a mediated locomotion technique has to be used. Due to the mediated locomotion and the large FOV of the VR headset (which contribute to cybersickness), the occurrence of cybersickness is more likely than with the other two system variants. The system relies on external lighthouse tracking, which provides a high tracking accuracy. As the number of lighthouse stations increases, the

tracking becomes more robust. A powerful computer with a high-quality graphics card is mandatory to guarantee a stable and detailed visualisation of the virtual world. For these reasons the buying price of the system is much higher than the price of the stand-alone system. The main advantage over both other types of systems is the small space requirement. A room of normal size that can be shielded from direct sunlight is sufficient. If natural walking in small virtual worlds should still be an option, the test room should be sufficiently large and unobstructed. However, natural movement requires not letting the test person feel the motion-restricting cable connection to the PC (which is not required in the stand-alone system). For this purpose, it is preferable to use a wireless adapter - if available - or a mobile system with a laptop, which is carried by the test persons in a backpack, rather than using cable rails on the ceiling. The use of the laboratory-based system is especially recommended when a high quality of visual experience (e.g. high FOV) is important, but no exact walking-related measurements are required. Data privacy issues are not known for any of the proposed components of the system. By using sensor-equipped VR-shoes in a sitting position (or by using a treadmill with a safety bar), the VR system can also be used without risk for vulnerable test persons.

The high fidelity system offers both a high quality of visual experience (as the laboratory-based system) and natural walking (as the stand-alone

system). This creates a high degree of realism. The possible effect of the large FOV on the occurrence of cybersickness should be significantly attenuated by natural walking. A small impairment of the overall experience (compared to the stand-alone system) might result from the weight of the wireless adapter mounted on top of the VR headset (if available and provided with the required range) or the weight of a backpack used to guarantee freedom of movement. Like the laboratory-based system, it allows for high tracking accuracy and a stable application, provided that a powerful computer including a high-quality graphics card is used. Since a larger tracking space has to be covered, a higher number of lighthouse stations is required for reliable tracking. Since the system combines both key requirements for realism (a realistic visual experience and natural walking), it is applicable for a multitude of research topics. However, the technical implementation is challenging due to the high economic requirements (space requirement, even higher costs than for the laboratory-based system). There are no known data privacy issues for the proposed components. Additional safety measures should be taken to avoid falling in critical scenarios or for vulnerable subjects.

Due to the different advantages and disadvantages of the three system variants, it is not possible to make an unconditionally valid recommendation as to which system is preferable to the others. This decision depends on the requirements of the research topic and the conditions for implementation (e. g. available space, budget). For this purpose, the overview of the various possible applications of VR headsets for examining pedestrian behavior and the associated requirements for a VR system developed in the project might guide this decision.

Assessment of possible applications of the VR systems:

An overview of possible research topics in pedestrian safety and mobility was developed (e.g., examining perception in traffic, the design of a safe, comfortable and barrier-free traffic environment, interactions with vulnerable and motorized road users, etc.). Subsequently, the requirements for their technical implementation were described. Based on this overview, recommendations were made as to which of the three described system variants can be used to best investigate the respective research topic.

Experiences with eye tracking, the integration of elderly test subjects and suggestions for the technical implementation of smartphone use in VR:

VR headsets use eye tracking to improve the resolution in the area of the sharpest vision on the retina. Capturing gaze-related measures is possible but rarely used. Stable recording of gaze data while running the application apparently requires shorter trial intervals and an extremely powerful computer to save gaze data to disk only after completion of the trial. Availability and quality of eye tracking data depend on characteristics of the subjects (e.g., tracking is hardly possible if people wear glasses), the VR headsets (accuracy depends on the model or rather the algorithm used), and the scenario (extreme horizontal and vertical gaze movements are prone to tracking errors).

According to past experiences, elderly people can easily be included in VR studies, provided that their stereopsis is unimpaired and they are open-minded towards this technology. However, some problems can arise, especially when moving through the virtual world. In controller-based locomotion, comprehensive training is necessary. When using a technique that is closer to natural walking, safety measures must be taken to avoid falls due to balance problems, such as using a mediated locomotion technique that can be carried out in a seated position or providing the opportunity to hold on to a solid object that is visible in the virtual world as well. The transitions between the real and the virtual world can be facilitated by keeping the real world visible through the VR headsets before the simulation starts or after it ends. Cameras integrated in (some) VR headsets can record the environment and show it on the display.

Smartphone use in VR can be necessary to study pedestrian distraction. Virtual smartphone use can be implemented in different ways. The simplest way would be to mirror the display of a real smartphone in the virtual world. Simple and inexpensive tools are already available for this purpose. Care must be taken to ensure low latency (5G recommended), readability of the display (enlargement might be necessary) and the possibility of texting despite small input fields (use of a tablet instead of a smartphone might be necessary). Inputs are recorded via hand tracking using a controller or a data glove.

4. Outlook

Three types of systems have been described and assessed with regard to the requirements defined beforehand. The final recommendation of the VR headset was made by emphasizing the importance of certain features (especially the FOV). As the VR system will be used for research, it should correspond as closely as possible to real world experiences and behavior, so that valid conclusions about real traffic behavior from the data generated in virtual worlds can be drawn. This raises the question to what extent the VR systems described here differ in validity of behavioral measures, both from each other and from the real world. As no findings are currently available in this regard, the extent and significance of differences between mediated locomotion and natural walking in the virtual and the real world should be the subject of further studies. In addition, the influence of the size of the FOV on the validity of behavioral measures should be examined, as even the VR headset chosen for its large FOV does not quite reach a person's normal field of view. According to initial findings, behavior in the virtual world experienced through VR headsets is similar, though not fully comparable to behavior in the real world (Feldstein & Dyszak, 2020). Therefore, the currently feasible VR systems cannot replace real world studies, but only offer an alternative to screen- or projection-based simulations and enable the study of certain questions that cannot be investigated in real traffic or only at great expense.

Due to rapid development cycles for VR components in general and VR headsets in particular, new devices are likely to emerge in the near future. These future models will probably offer a higher performance and facilitate easier and more convenient use of the technology. With the given focus on stand-alone VR headsets, there is quite a chance that a stand-alone VR system with a high quality of visual experience and a large field of view can be realized in the foreseeable future. The cost-benefit ratio would thereby shift from the cost-intensive and room-bound high-fidelity system towards the lower-cost and room-independent stand-alone VR system, which could then be used as research tool for a wider variety of research topics. All in all, the recent developments indicate that previously irreconcilable-seeming functions and performance criteria (e.g. natural movement vs. realistic visualisations) of VR systems might be reconciled. In light of these developments, we can

expect to see an increase in the prevalence and use of VR systems in experimental behavioral research.

Inhalt

1	Einleitung	13	5.3	Kriterienkatalog	44
1.1	Potenziale von VR in der Verkehrssicherheitsforschung	13	6	Expertenbefragung	46
1.2	Zielstellung und Vorgehen	15	6.1	Zielstellung	46
2	Aspekte virtuellen Erlebens	16	6.2	Vorgehen	46
2.1	Immersion und Präsenz	17	6.2.1	Ausgewählte Szenarien	47
2.2	Virtuelle Verkörperung	18	6.2.2	Ablauf und Inhalte der Befragung	47
2.3	Raumwahrnehmung	19	6.3	Ergebnisse	49
2.4	Bewegungswahrnehmung	20	6.3.1	VR-Komponenten und Entscheidungskriterien	49
2.5	Cybersickness	21	6.3.2	Varianten von VR-Systemen	53
2.6	Resümee	23	6.3.3	Erfahrung mit Eye-Tracking in VR-Systemen	55
3	Möglichkeiten zur technischen Umsetzung von VR-Systemen	23	6.3.4	Einbindung von Hochaltrigen in VR-Studien	56
3.1	Beschreibung der Komponenten und Technologien	23	6.3.5	Umsetzungsmöglichkeiten der Smartphonennutzung in VR	56
3.1.1	VR-Brillen	23	6.4	Abschätzung der Verwendbarkeit der Varianten für die Verhaltensforschung bei Fußgängern	57
3.1.2	Trackingtechnologien	26	6.5	Beschreibung und Bewertung der Systemvarianten	62
3.1.3	Hand- und Körpertracking	28	6.5.1	Wahl der VR-Brille und der Fortbewegungstechnik	62
3.1.4	Fortbewegung durch die virtuelle Welt	29	6.5.2	Vergleichende Übersicht über die Systemvarianten	63
3.2	Zusammenfassung des Einflusses technischer Umsetzungen auf die Erlebnisqualität	32	7	Fazit	66
4	Exkurs: Bisheriger Einsatz von VR-Brillen in Fußgänger- und Fahrsimulatoren	33	8	Ausblick	69
4.1	Vorgehen	33	Literatur	70	
4.2	Ergebnisse	38	Bilder	78	
4.3	Ableitung von Erfahrungswerten für die Untersuchung von Fußgängerverhalten mit VR-Systemen	40	Tabellen	78	
5	Anforderungen an ein VR-System für Verhaltensstudien	42			
5.1	Inhaltliche Anforderungen zur Durchführung von Verhaltensstudien	42			
5.2	Versuchsökonomische Anforderungen an ein VR-System zur Durchführung von Experimentalstudien	43			

1 Einleitung

1.1 Potenziale von VR in der Verkehrssicherheitsforschung

Die Gewährleistung einer nachhaltigen und sicheren Mobilität für alle Verkehrsteilnehmer ist eine wichtige gesellschaftspolitische Aufgabe. Ein zentrales Ziel ist die „Vision Zero“, d. h. die Vermeidung von Verkehrsunfällen mit schweren oder gar tödlichen Verletzungen (BMVD, 2022). Trotz erheblicher Erfolge in den vergangenen Jahrzehnten und einem historischen Tief der Unfalltoten im Jahr 2020 in Deutschland liegt die Zahl tödlich verunglückter Verkehrsteilnehmer weiterhin bei 2.719 Personen (DESTATIS, 2021). Der hohe Anteil tödlich verunglückter Pkw-Fahrer wird auf die Dominanz des Pkws gerade auf außerörtlichen Straßen zurückgeführt. Innerorts hingegen zählt man die meisten Toten bei den ungeschützten Verkehrsteilnehmern, darunter vor allem Fußgänger und Radfahrer (EBD., 2021).

Die Verkehrsforschung verfügt über ein breites Methodenrepertoire zur Untersuchung der Unfallursachen und geeigneter Sicherheitsmaßnahmen. Dazu gehören epidemiologische Studien, Unfallanalysen und nicht zuletzt Verhaltensanalysen unter natürlichen (bspw. Naturalistic Driving Studies) oder experimentellen Bedingungen. Letztere ermöglichen die gezielte Untersuchung der Kausalwirkung möglicher Einflussfaktoren. Experimente im realen Straßenverkehr bieten den Vorteil einer hohen ökologischen Validität, so dass die erzielten Studienergebnisse auch außerhalb des experimentellen Rahmens Gültigkeit besitzen. Gleichzeitig ist ihre Durchführung mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Störfaktoren können nicht verlässlich ausgeschlossen oder kontrolliert werden, so dass vergleichbare Versuchsbedingungen über Probanden hinweg kaum gewährleistet werden können. Des Weiteren gibt es ungeachtet der Notwendigkeit dieser Forschung Grenzen, inwieweit man Probanden potenziell gefährlichen Situationen aussetzen kann. Und nicht zuletzt sind manche Studien schlichtweg nicht realisierbar, wenn sie sich auf neue Entwicklungen im Fahrzeug oder in der Verkehrsumwelt richten. Das automatisierte Fahren beispielsweise verändert die Anforderungen an die Fahrzeugführung ebenso wie die Interaktion mit nicht automatisierten Fahrzeugen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern (MORALES-ALVAREZ et al., 2020; TABONE et al., 2021). Die Abkehr von der autozentrierten Stadt zugunsten einer höheren Aufenthalts-

qualität öffentlicher Räume für nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer stellt wiederum neue Anforderungen an die Verkehrsraumgestaltung (ANCIAES & JONES, 2020).

Mit einer Verlagerung derartiger Experimente in einen Nachbau der realen Welt (die sogenannte virtuelle Realität, kurz: VR) lassen sich auch derartige neue Entwicklungen vergleichsweise einfach realisieren und gefahrlos unter Ausschluss etwaiger Störfaktoren untersuchen. Mittlerweile existieren unterschiedliche methodische Ansätze, um das Erleben und Verhalten unterschiedlicher Verkehrsteilnehmergruppen in VR untersuchen zu können. Ein etabliertes Instrument ist hier der Fahrsimulator zur Untersuchung des Fahrverhaltens von Pkw-Fahrern in einer kontrollierbaren und sicheren Versuchsumgebung. Mit Blick auf die technische Umsetzung und die damit verbundene Nähe zum realistischen Fahrerleben lässt sich zwischen 1) einfachen Simulatoren mit einem Monitor, Pedalerie und Lenkrad, 2) mehreren Bildschirmen oder Projektoren samt Fahrgastzelle eines Pkws und 3) einer aufwändigen und teuren High Fidelity-Variante mit großflächiger, das Sichtfeld umspannender Projektion der virtuellen Welt und einem Fahrzeug mit Bewegungsplattform zur Abbildung der auf den Fahrer einwirkenden Kräfte unterscheiden (WEIR & CLARK, 1995; WYNNE et al., 2019). In vergleichbaren virtuellen Versuchsumgebungen lassen sich unter Einsatz von Fahrrad- und Motorradnachbauten mit oder ohne Bewegungsplattform Verhaltensstudien mit Fahrern einspuriger Fahrzeuge durchführen (bspw. HAMMER et al., 2021; KOVÁČSOVÁ et al., 2020; O'HERN et al., 2017).

Einen besonderen Anwendungsfall stellt der Fußgängersimulator dar, da die natürliche Form der Fortbewegung in der realen Welt per se unvermittelt, d. h. ohne Übersetzung durch Pedalerie oder Lenkvorrichtung erfolgt. Zur Fortbewegung als Fußgänger in der virtuellen Welt hingegen existieren unterschiedliche, darunter auch vermittelte Fortbewegungstechniken, die mit unterschiedlich aufwändigen Visualisierungen der virtuellen Welt kombiniert werden können. Einfache Simulatoren beschränken die Anzeige der virtuellen Welt auf drei Monitore (MEIR et al., 2015), und die Fortbewegung durch diese Welt auf artifizielle Eingaben mittels Tastatur oder Joystick (MOUSSAÏD et al., 2016; THRASH et al., 2015). Aufwändige CAVEs (cave automatic virtual environment) verwenden raumfüllende Projektionen der virtuellen Welt, zwischen denen sich Probanden frei bewegen können (MALLA-

RO et al., 2017; PALA et al., 2021). In Hinblick auf das subjektive Erleben, die Präferenz der Probanden und die Praktikabilität im Einsatz schneiden CAVEs jedoch schlechter ab als die mobiler und einfacher einzusetzenden VR-Brillen (EBD.).

Derartige Virtual Reality-Brillen (VR-Brillen) versprechen eine neue Qualität der virtuellen Erfahrung. Sie versetzen ihre Nutzer mitten in eine sie gänzlich umgebende virtuelle 3D-Welt und schotten dabei jedweden visuellen Reiz der realen Außenwelt ab. Die Schwächen klassischer bildschirm- oder projektionsbasierter Simulatoren, wie die eingeschränkte Tiefenwahrnehmung oder das Gefühl, von außen auf die virtuelle Welt zu schauen anstatt sie als ringsumgebend wahrzunehmen, werden dadurch aufgefangen. So erreicht man eine höhere Realitätsnähe der virtuellen Umgebung, bewegt sich aber gleichzeitig noch in einer kontrollierbaren und sicheren Versuchsumgebung. Die Preise von VR-Brillen liegen inzwischen deutlich unter den Kosten, die man für großflächige Projektionssysteme aufwenden müsste. Während vor etwa 20 Jahren eine VR-Brille mit einem kleinen Sichtfeld von nur 50° und einer Auflösung von 1.024 x 768 Pixeln etwa 20.000 \$ kosten konnte (MOURANT & SCHULTHEIS, 2001), bieten aktuelle VR-Brillen angesichts der rasanten Entwicklungen bei Grafik- und Rechenleistung in den vergangenen Jahren eine hohe Leistungsfähigkeit zu einem Bruchteil des Preises. Von unterschiedlichen Herstellern einschließlich der Spieleindustrie werden von Jahr zu Jahr neue VR-Brillenmodelle entwickelt, die sich in ihren Eigenschaften (bspw. Funktionsumfang, Bildqualität, Abhängigkeit von externen Komponenten) teils erheblich unterscheiden.

Eine Ergänzung der VR-Brille um weitere Komponenten kann das Erleben und Agieren (in) virtuellen Welten multimodal und interaktiv gestalten. Zur Fortbewegung stehen Eingabegeräte für per se vermittelte Verkehrsteilnahmearten (bspw. Lenkrad und Pedalerie beim Autofahren) zur Verfügung. Auch für das Erleben der virtuellen Welt aus Fußgängerperspektive gibt es vielfältige Konzepte, die eine Nachahmung der natürlichen Fortbewegung anstreben (bspw. Laufbänder) oder auf abstrakte Techniken (bspw. Teleportation) setzen. Mittels zusätzlicher Komponenten können gesten- oder blickgesteuerte Interaktionen ermöglicht oder virtuelle Objekte durch taktiles Feedback taktile erlebbar werden. Der Verbund der dazu erforderlichen Hard- und Softwarekomponenten wird nachfolgend als VR-System bezeichnet (DÖRNER et al., 2019).

Als Teilsysteme eines VR-Systems nennen DÖRNER et al. (2019) die Sensorik, die Ausgabegeräte und die übrigen Komponenten, welche die Sensoreingaben verarbeiten und die virtuelle Welt in Sinneseindrücke übersetzen (Bild 1). Über die Sensorik werden die Bewegungen des Nutzers erfasst (sogenanntes Tracking). Die unterschiedlichen Trackingverfahren werden in Kapitel 3.1.2 erläutert. Informationen aus unterschiedlichen Sensoren werden verknüpft (Sensorfusion) und an die Weltsimulation weitergegeben, die u. a. die Detailtreue der virtuellen Welt und das Verhalten der darin befindlichen Objekte bestimmt. Beim Rendering werden die Ausgaben der virtuellen Welt erzeugt und über die visuellen, akustischen, haptischen oder propriozeptiven Ausgabegeräte als Sinneseindrücke übermittelt. Die Auswahl der erforderlichen Sensoren und der Ausgabegeräte sollte dabei stets mit Blick auf den Anwendungsfall des VR-Systems erfolgen.

Zu den Hardwarekomponenten, die diese Ein- und Ausgaben generieren, gehört grundsätzlich die VR-Brille zur Visualisierung der virtuellen Welt. Die integrierten Beschleunigungssensoren (d. h. Inertialsensoren) erfassen Kopffrotationen und bieten damit bereits eine reduzierte Form des Trackings. Darüberhinausgehende Kopfbewegungen erfordern ein Positionstracking (s. Kapitel 3.1.2).

In Abhängigkeit vom intendierten Anwendungsfall müssen gegebenenfalls Komponenten zur Fortbewegung oder Interaktion in der virtuellen Welt ergänzt werden. Bei einem Erleben der virtuellen Welt aus Perspektive eines Fußgängers öffnen sich hier im Gegensatz zum Fahrsimulator (Lenkrad, Pedalerie als Eingabegeräte) viele mehr oder minder natürlich anmutende Alternativen, sofern man bereit bzw. gezwungen ist, auf das normale Gehen zu verzichten (s. Kapitel 3.1.4). Eine Interaktion mit Objekten oder Verkehrsteilnehmern in der virtuellen Welt kann die Erfassung von Hand- oder Körperbewegungen erforderlich machen, bspw. durch Anziehen

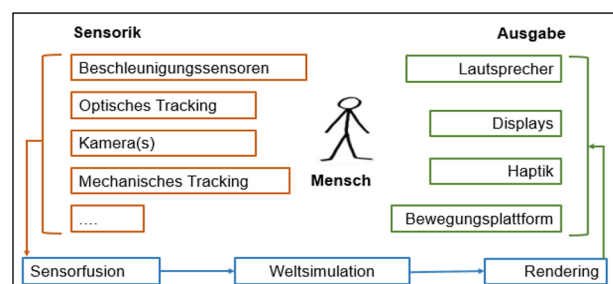


Bild 1: Überblick über mögliche Teilsysteme eines VR-Systems nach DÖRNER et al. (2019)

oder anderweitige Befestigung von Sensoren am Körper oder kontaktfrei durch im Raum oder an der VR-Brille angebrachte Kameras (s. Kapitel 3.1.2 und 3.1.3).

Die in Bild 1 skizzierte Trennung von Eingabe und Ausgabe ist auf Ebene der VR-Komponenten wenig zielführend, da viele Komponenten durchaus beides leisten können. Eine VR-Brille erfasst Kopfbewegungen und visualisiert die virtuelle Welt. Manche Datenhandschuhe oder Controller erfassen die Handposition und geben ein haptisches Feedback aus. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Technologien, Komponenten und deren Eigenschaften erfolgt in Kapitel 3.

1.2 Zielstellung und Vorgehen

Zielstellung des vorliegenden Projektes ist es, die Einsatzmöglichkeiten von VR-Brillen in der Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung zu untersuchen. Durch die Vielfalt an VR-Komponenten und deren Kombinationsmöglichkeiten gibt es zahlreiche Möglichkeiten zur technischen Umsetzung eines VR-Systems. Entsprechend ist ein zentrales Ziel die Beantwortung der Frage, welche der verfügbaren VR-Brillen und etwaige weitere VR-Komponenten gewählt werden müssen, um ein möglichst realistisches Erleben und Verhalten (in) der virtuellen Welt mit den Erfordernissen eines validen Forschungsinstruments verbinden zu können. Um aus den zahlreichen Optionen das zur Verhaltensforschung bestmöglich geeignete VR-System aufbauen zu können, müssen vorab die konkreten Anforderungen definiert werden.

Wie einleitend beschrieben ermöglicht der Einsatz von VR-Systemen prinzipiell die Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Verkehrsteilnehmergruppen. Um die Anforderungen an ein VR-System konkret und handlungsleitend beschreiben zu können, muss die Anforderungsdefinition auf die interessierende Verkehrsteilnahmeart zugeschnitten werden. Um einen ausreichenden Detaillierungsgrad gewährleisten zu können erscheint es zielführend, den Schwerpunkt der im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen auf eine Verkehrsteilnehmergruppe auszurichten. Aus Sicht der Autoren des vorliegenden Berichts besteht aus den folgenden zwei Gründen ein besonderer Forschungsbedarf bei der Konzeption eines VR-Systems zur Untersuchung von Fußgängerverhalten. Zum einen ist die Untersuchung von Fußgängerver-

halten in VR, beispielsweise mit Hilfe von projektionsbasierten Fußgängersimulatoren, vergleichsweise selten, während mit verschiedenartigen bildschirm- und projektionsbasierten Fahrsimulatoren etablierte Instrumente für Verhaltensstudien mit Pkw-Fahrern zur Verfügung stehen. Zum anderen stellen sich beim Aufbau eines VR-Systems für Fußgänger wichtige konzeptuelle Fragen, insbesondere hinsichtlich der geeigneten Fortbewegung durch die virtuelle Welt, die bei der Fahrsimulation (Lenkrad und Pedalerie) grundsätzlich beantwortet sind. Dahingegen gibt es bei dem Erleben der virtuellen Welt aus Fußgängerperspektive unterschiedliche Alternativen zur natürlichen Fortbewegung, deren jeweilige Vor- und Nachteile auch mit Blick auf die Anforderungen an ergänzende Komponenten des VR-Systems (bspw. dem Tracking der Probanden) abgewogen werden müssen. Daher wird im Anschluss an die einleitenden Kapitel des Berichts, die für den Einsatz von VR-Brillen bei Fußgänger- wie Fahrsimulationen bedeutsam sind (s. Kapitel 2 bis 4), der Fokus auf die VR-Fußgängersimulation gelegt.

Hauptziel des vorliegenden Projekts ist es, die Anforderungen an ein brillenbasiertes VR-System zur experimentellen Untersuchung von Fußgängerverhalten zu beschreiben und konkrete Empfehlungen zur Umsetzung eines solchen VR-Systems zu geben. Darüber hinaus sollen dessen Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt und mit Blick auf zukünftige Entwicklungen eingeordnet werden. Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

- 1) In einer Literaturübersicht wurden unterschiedliche Aspekte der Erlebnisqualität virtueller Welten (Immersion und Präsenz, Cybersickness, etc.) und die Eigenschaften eines VR-Systems (Displaymerkmale, Kongruenz unterschiedlicher Sinneseindrücke, etc.) beschrieben, die auf die Erlebnisqualität wirken (Kapitel 2).
- 2) Verschiedene VR-Komponenten und ihre Eigenschaften wurden zusammenfassend dargestellt. Dabei lag der Fokus auf den Hardwarekomponenten und -technologien, d. h. den VR-Brillen, den Trackingtechnologien und -komponenten (auch zum Hand- oder Körpertracking) sowie den Möglichkeiten zur natürlichen oder technisch vermittelten Fortbewegung (Kapitel 3).
- 3) Aus den Publikationen der vergangenen Jahre wurde eine Übersicht über bislang in der verkehrsbezogenen Forschung verwendete VR-

Systeme erstellt, um etwaige handlungsleitende Erfahrungswerte für das eigene Vorhaben daraus ableiten zu können (Kapitel 4).

- 4) Anschließend wurden die inhaltlichen und ökonomischen Anforderungen an ein Forschungsinstrument dargelegt. Aus den vorangegangenen Arbeiten (Literaturübersicht in Kapitel 2, Komponentenübersicht in Kapitel 3 und Anforderungsdefinition in den Kapiteln 5.1 und 5.2) wurde ein Kriterienkatalog abgeleitet, der die Anforderungen an ein VR-System zur wissenschaftlichen Untersuchung von Fußgängerverhalten beschreibt (Kapitel 5.3).
- 5) Im Rahmen einer Expertenbefragung wurden auf Basis von zwei exemplarischen Anwendungsfällen mehrere VR-Systeme zur Untersuchung von Fußgängerverhalten identifiziert, beschrieben und anhand des vorab entwickelten Kriterienkatalogs bewertet. Zudem wurde die Eignung dieser VR-Systeme zur Untersuchung unterschiedlicher Forschungsthemen diskutiert (Kapitel 6).
- 6) Im Ausblick erfolgte eine vorsichtige Prognose der weiteren technischen Entwicklung basierend auf Aussagen der Experten und ihrer möglichen Bedeutung für die Umsetzung der identifizierten Systemvarianten (Kapitel 8).

2 Aspekte virtuellen Erlebens

Virtuelle Welten sollen als möglichst echt erlebt werden, so dass sie Verhaltensweisen triggern, die dem in realen Situationen gezeigten Verhalten gleichen (SLATER, 2003; SANCHEZ-VIVES & SLATER, 2005). Eine realistische „Als-ob“-Erfahrung ist somit die Voraussetzung dafür, Erkenntnisse zum virtuellen Erleben und Verhalten von Probanden auf die reale Welt übertragen zu können. Im vorliegenden Kapitel soll daher eine Übersicht über Aspekte der Erlebnisqualität virtueller Welten und die Eigenschaften eines VR-Systems, die auf diese Erlebnisqualität wirken, erfolgen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen der späteren Definition der Anforderungen an ein VR-System (s. Kapitel 5.3 zum Kriterienkatalog).

Wie realistisch virtuelle Welten erlebt werden, wird von den Eigenschaften eines VR-Systems, und damit der Auswahl und Zusammenstellung der VR-Komponenten, mit beeinflusst. Diese Komponenten

machen sich Prozesse der menschlichen Wahrnehmung zunutze, um glaubhafte Illusionen zu schaffen. Dazu gehört beispielsweise der von der VR-Brille künstlich erzeugte Tiefeneindruck durch Schaffung eines leicht unterschiedlichen Netzhautbildes in Abhängigkeit von der „Entfernung“ eines virtuellen Objekts vom Betrachter, oder die Illusion von Eigenbewegung durch Darbietung bewegter Objekte im Sichtfeld.

Als Wahrnehmungsaspekte von VR nennen DÖRNER UND STEINICKE (2019) die Raumwahrnehmung (Kapitel 2.3), die Bewegungswahrnehmung (Kapitel 2.4) und die nicht nur rein wahrnehmungsbezogenen, sondern auch kognitiv geprägten Konstrukte der Immersion und Präsenz (Kapitel 2.1), welche die Qualität der virtuellen Erfahrung charakterisieren. Diese Qualität virtuellen Erlebens geht in erheblichem Maße auf Umfang und Kohärenz der vermittelten Sinneseindrücke zurück. Wird diese Kohärenz verletzt, bspw. indem widersprüchliche visuelle und vestibuläre Sinneseindrücke erzeugt werden, kann Cybersickness auftreten. Eigenschaften eines VR-Systems können daher Auftreten und Ausmaß von Cybersickness beeinflussen (Kapitel 2.5).

VR-Brillen weisen eine weitere Besonderheit gegenüber projektions- oder bildschirmbasierten VR-Ansätzen auf, und zwar die Eliminierung des menschlichen Körpers aus dem Sichtfeld des Probanden. Es gibt verschiedene technische Möglichkeiten, diesen als virtuelles Gegenstück in die virtuelle Welt zurückzuholen. Simple Ansätze platzieren ihn in der virtuellen Welt allein auf Basis der erfassten Kopfposition ungeachtet der Bewegungen des Rumpfes und der Extremitäten (Fußgängerszenario) oder reduzieren die Armbewegungen auf die Veränderungen der Lenkradposition (Pkw-Szenario). Mit größerem Erhebungsaufwand durch mehrere Messpunkte am Körper oder VR Pass-through-Techniken (s. Kapitel 4.2 für Anwendungsbeispiele) wird die Darstellung der Körperbewegungen detailgetreuer. Damit stellt sich jedoch die Frage, inwieweit der virtuelle Körper in der virtuellen Welt erforderlich ist, insbesondere, wenn er keine konkrete Funktion (bspw. Gesten oder Greifen) erfüllen soll außer der Selbstrepräsentation. Daher wird im Anschluss an die Erläuterung der Immersion und Präsenz die Bedeutung der virtuellen Verkörperung für die Wahrnehmung der virtuellen Welt und das Präsenzgefühl dargelegt und die Faktoren benannt, die bei dem Aufbau der virtuellen Verkörperung zu beachten sind (Kapitel 2.2).

2.1 Immersion und Präsenz

Um die Qualität der virtuellen Erfahrung zu beschreiben, haben sich die Begriffe der Immersion und der Präsenz etabliert. Der Begriff der Immersion wird auch aufgrund seiner domänenübergreifenden Verwendung (Forschung, Videospiele, Film, Literatur) nicht konsistent verwendet (NILSSON et al., 2016). Etymologisch bezeichnet Immersion das Ein- oder Untertauchen, das sich in seiner gegenwärtigen Bedeutung explizit auf das Eintauchen in eine virtuelle Umgebung bezieht (DUDENREDAKTION, o. J.). Diese Metaphorik des Eintauchens wird im Rahmen der Definition von Immersion im Forschungsfeld der virtuellen Realität vielfach aufgegriffen. Oftmals wird Immersion als Gefühl des Umgebenseins von der virtuellen Umgebung beschrieben, das durch wiedergabegetreue und multisensorische künstliche Reize in Interaktion mit der virtuellen Welt hervorgerufen bzw. verstärkt wird (ARSENAULT, 2005; MCMAHAN, 2003; WITMER & SINGER, 1998). Beeinflusst wird Immersion zudem durch die Abschottung von der realen Welt und der Wahrnehmung von Eigenbewegung in einer virtuellen Welt, mit der auf natürlichem Wege interagiert werden kann und von der man sich als Teil fühlt (WITMER & SINGER, 1998). Die technischen Eigenschaften eines VR-Systems tragen somit zur Immersion bei bzw. begrenzen selbige in dem Maße, in dem sie bei der Umsetzung einer möglichst multisensorischen, realitätsnahen und interaktiven Erfahrung an ihre Grenzen stoßen.

In anderen, stärker kognitiv geprägten Begriffsdefinitionen werden anstelle der passiv anmutenden Erfahrung des Umgebenseins kognitive Aspekte wie die fokussierte Aufmerksamkeit und die gedankliche Vertiefung betont, wie sie bspw. mit an den Nutzer gestellten Aufgaben oder starken narrativen Elementen auftreten (MCMAHAN, 2003; ADAMS & ROLLINGS, 2006). Andere sehen Immersion als das verkörpert, was das Konzept des Flows beschreibt (CSIKSZENTMIHÁLYI, 1990), nämlich das als beglückend erlebte völlige Eintauchen in einer Tätigkeit, auf die alle Konzentration gerichtet wird, so dass man sich selbst und die Zeit darüber vergisst (MÜTTERLEIN, 2018).

Im Gegensatz zu diesen Ansätzen, die Immersion als subjektive Erfahrung oder Reaktion des Nutzers auf die Exposition in der virtuellen Welt beschreiben, steht die Sicht auf Immersion als technische Qualität eines Mediums per se (CUMMINGS & BAILLSEN, 2016) oder als Produkt der technischen

Eigenschaften des VR-Systems (SLATER, 2003). Je umfassender und wirklichkeitsgetreuer das VR-System demnach die unterschiedlichen Sinnesmodalitäten anspricht oder ein realistisch anmutendes Tracking ermöglicht, desto immersiver ist das System. Gemäß dieser Definition wird die Immersion zu einer objektiven Eigenschaft eines VR-Systems, die unabhängig von den interindividuell unterschiedlichen Reaktionen seiner Nutzer auf die damit vermittelte VR-Erfahrung besteht. Nach SLATER (2009) geht es dabei weniger um die Komponenten eines VR-Systems und deren Spezifikationen per se als vielmehr um das damit realisierbare Ausmaß an kohärentem sensomotorischen Erleben und Verhalten. So bestimmt beispielsweise eine technische Spezifikation wie die Displayauflösung das Ausmaß, in dem eine Betrachtung eines Objekts aus nächster Nähe möglich ist (EBD.). Die unterschiedlichen Spezifikationen der Komponenten eines VR-Systems tragen somit nicht für sich genommen zur Immersion bei, sondern nur im kongruenten Zusammenspiel mit anderen Komponenten. Gerade in dem strikten Verzicht auf die Elemente der subjektiven Erfahrung grenzt sich diese Definition von den anderen ab und trennt zwischen dem mit technischen Mitteln Ermöglichten und dessen Erleben. Dies erleichtert zum einen die Abgrenzung zum nachfolgend erläuterten Konzept der Präsenz, lässt dafür aber die narrativen Elemente und die an den Nutzer gestellten Herausforderungen in der virtuellen Welt unberücksichtigt.

Eng verbunden mit dem Konzept der Immersion ist der Begriff der Präsenz. Den meisten Definitionsbemühungen zufolge ist Präsenz ein multidimensionales Konstrukt, das unterschiedliche wahrnehmungsbezogene und psychologische Faktoren vereint (JUSSELSTEIJN & RIVA, 2003; KALAWSKY, 2000). Ein definitionsübergreifend bestimmendes Element des Präsenzbegriffs ist die subjektive Erfahrung, sich an einem anderen Ort oder in einer Welt zu befinden, trotz der physischen Verhaftung in der realen Welt (z. B. SHERIDAN, 1992; WITMER & SINGER, 1998; SLATER, 2018; BIOCCA, 1997). Dazu kommt der Aspekt der Natürlichkeit oder der Realitätsnähe der Erfahrung. Für ZELTZER (1992) beschreibt Präsenz das Ausmaß, in dem die Ein- und Ausgaben des Systems denen des Menschen in Anzahl und Wiedergabetreue entsprechen. Andere heben die Natürlichkeit der Interaktion und die Nähe zu Erlebnissen der realen Welt hervor (WITMER & SINGER, 1998, WEBER et al., 2021). Nach LOMBARD und DITTON (1997) ist Präsenz die Illusion

einer unvermittelten Erfahrung, bei der die technischen Hilfsmittel als solche nicht mehr wahrgenommen werden. Dahingegen gibt es unterschiedliche Auffassungen von den Faktoren, die Präsenz konstituieren und selbst in Bezug zur Immersion setzen. WITMER und SINGER (1998) sehen Präsenz als Ergebnis von Immersion und der fokussierten Aufmerksamkeit des Nutzers auf kohärente Stimuli. Präsenz ist demnach immer auch das Ergebnis der Bereitschaft oder Fähigkeit des Betrachters, sich auf die virtuelle Erfahrung einzulassen. Multisensorische Erfahrungen und natürliche Interaktionen gehen mit einer hohen Präsenz einher, während Ablenkung durch andere aufmerksamkeitsheischende Reize oder Diskomfort bei der Nutzung die Präsenz mindert.

Im Gegensatz dazu hält SLATER (1999; SLATER, USOH & STEED, 1994) seine Präsenzdefinition frei von objektiv beschreibbaren Charakteristika der virtuellen Umgebung, die er der Immersion zugeordnet sieht, und beschreibt sie stattdessen allein auf Basis des subjektiven Erlebens. Demnach bestimmt sich das Ausmaß der Präsenz nach dem Gefühl, sich in der künstlich generierten Welt zu befinden (Ortsillusion), der Dominanz, die selbige gegenüber den Eindrücken der realen Welt einnimmt sowie danach, inwiefern das Virtuelle als Erfahrung eines Ortes oder von Ereignissen erinnert wird und nicht als reine Exposition gegenüber künstlichen Bildern. Mit stärkerem Explorationsverhalten der Nutzer kann die Präsenz steigen oder auch sinken, sobald die Grenzen der virtuellen Umgebung erfahrbar werden. Betont wird auch die Rolle des menschlichen Körpers zur Etablierung einer glaubhaften Ortsillusion (SLATER, 2009). Auch BIOCCA (1997) zufolge nimmt der (virtuelle) Körper einen bedeutenden Platz im Präsenzkonzept ein. Demnach wird auf Basis bestehender Arbeiten zur Verbindung zwischen Körper und Präsenz unter anderem zwischen dem Gefühl einer körperlichen Präsenz in der virtuellen Welt und der mentalen Repräsentation des Körpers aus Sicht des Nutzers unterschieden (vgl. Kapitel 2.2).

Die inhaltliche Abgrenzung von Präsenz und Immersion fällt deswegen schwer, weil sowohl die Immersions- als auch die Präsenzdefinitionen so unterschiedlich ausfallen. Eindeutig ist jedoch, dass beide Konzepte eng miteinander verbunden sind, und ein höherer Grad an Immersion mit einem höheren Grad an Präsenz einhergeht. Dies gilt unabhängig davon, ob das Konzept der Präsenz die Immersion als Subkomponente beinhaltet (bspw. bei

WITMER & SINGER, 1998) oder Präsenz die menschliche Reaktion auf die durch objektive Systemeigenschaften geschaffene Immersion darstellt (SLATER, 2003), die einer umfassenden Metaanalyse zufolge einen bedeutsamen Zusammenhang aufweisen (CUMMINGS & BAILENSEN, 2016). In beiden Sichtweisen erscheint Präsenz als das übergeordnete Konzept, das beeinflusst, ob sich Menschen verhalten, als ob die virtuelle Erfahrung real wäre. Obwohl diese Menschen wissen, dass sie eine künstliche Welt wahrnehmen, werden physiologische, automatisierte und intentionale Reaktionen und Verhaltensweisen sowie kognitive Prozesse getriggert, die denen in realen Situationen ähneln (SLATER, 2003; SANCHEZ-VIVES & SLATER, 2005). Dies ist die Voraussetzung dafür, realitätsnahes Erleben und Verhalten von Probanden in einem kontrollierbaren und geschützten (virtuellen) Raum zu ermöglichen.

2.2 Virtuelle Verkörperung

Im Gegensatz zu bildschirm- oder projektionsbasierten Ansätzen schottet eine VR-Brille die reale Welt von der virtuellen ab, und zwar einschließlich der Körper ihrer Nutzer. Für viele Anwendungsszenarien mag die mangelnde Sichtbarkeit des eigenen Körpers keine große Rolle spielen, insbesondere wenn die Exposition virtueller Inhalte (bspw. Videos) im Fokus steht. Auch die Eigenbewegung in der virtuellen Welt lässt sich an und für sich problemlos ohne jedwede Verkörperung der Nutzer realisieren. Dennoch wird oftmals eine Darstellung des Körpers zumindestens als wünschenswert, wenn nicht gar als zwingend erforderlich erachtet. Diese virtuelle Verkörperung kann sich auf die Darstellung der Hände beschränken oder den gesamten Körper einbeziehen. Dabei gibt es unterschiedlich aufwändige und unterschiedlich detailgetreue technische Möglichkeiten, den Körper virtuell darzustellen. Simple Ansätze platzieren ihn in der virtuellen Welt allein auf Basis der erfassten Kopfposition ungeachtet der Bewegungen des Rumpfes und der Extremitäten (Fußgängerszenario) oder reduzieren die Armbewegungen auf die Veränderungen der Lenkradposition (Pkw-Szenario). Unter Verwendung zusätzlicher VR-Komponenten (s. Kapitel 3.1.3) wird die Darstellung der Körperbewegungen detailgetreuer. Ziel ist dabei, die eigenen Bewegungen aus der Egoperspektive erlebbar zu machen.

Als wünschenswert gilt die virtuelle Verkörperung in Form eines Avatars zunächst, weil sie die Betrachter im virtuellen Raum verankert und dadurch hilft, Präsenz und Aufgabenleistung zu steigern (SLATER et al., 2010; STEED et al., 2016). Darüber hinaus liefert sie wichtige Größenhinweise zur Skalierung der virtuellen Welt, die in Bezug zum virtuellen Körper und seinen Bewegungen erfolgt. Dadurch wird der in virtuellen Welten üblichen Unterschätzung von Entfernungen entgegengewirkt (vgl. Kapitel 2.2) und eine akkuratere Entfernungseinschätzung unterstützt (MOHLER et al., 2010). Zwingend erforderlich ist eine virtuelle Repräsentation der Nutzer hingegen beispielsweise dann, wenn diese Manipulationen an virtuellen Objekten vornehmen sollen, so dass je nach Aufgabe die Position und Lage des Körpers, der Hand, der Finger oder gar Fingerglieder nachvollzogen und in der virtuellen Welt dargestellt werden muss. Um dies zu gewährleisten, gibt es unterschiedliche technische Umsetzungen (vgl. Kapitel 3.1.2 und 3.1.3).

Erforderlich ist, dass die Nutzer die virtuelle Verkörperung als ihnen zugehörig anerkennen. Dabei werden drei Facetten mit dem Gefühl der Verkörperung in Verbindung gebracht: Das Gefühl, sich in dem Körper zu befinden und nicht (nur) innerhalb der Welt, Kontrolle über und mit diesem Körper auszuüben (self-agency) sowie den virtuellen Körper als den eigenen anzunehmen (KILTENI et al., 2012; BORREGO et al., 2019). Das Gefühl der Verkörperung lässt sich über räumlich und zeitlich kongruente Reize zwischen dem eigenen Körper und dem virtuellen realisieren, und zwar dadurch, dass beide Körper(-teile) vergleichbar ausgerichtet sind, sich gleichzeitig auf dieselbe Weise bewegen oder taktile Empfindungen am eigenen Körper mit sichtbaren Stimulationen des virtuellen Körpers einhergehen (GONZALEZ-FRANCO, et al., 2010; KOKKINARA et al., 2015; MASELLI & SLATER, 2013). Größere Abweichungen zwischen dem realen und dem virtuellen Körper können das Gefühl der Verkörperung auflösen (z. B. BANAKOU et al., 2013) oder andere unerwünschte Folgen nach sich ziehen. So kann sich ein räumlicher oder zeitlicher Versatz (Latenz) zwischen den motorischen Aktionen des Nutzers und den sichtbaren Folgebewegungen seines virtuellen Selbst nachteilig auswirken. Mögliche Folgen einer solchen zeitlichen Diskrepanz sind ein Verlust des Kontrollgefühls über den Körper (SATO & YASUDA, 2005) sowie das Auftreten von Cybersickness, d. h. einer Form von Bewegungskrankheit, die in virtuellen Welten auftritt (vgl. Kapitel 2.5).

Bei einem sichtbaren räumlichen Versatz zwischen sich und ihrem Avatar sind Probanden bemüht, diesen dadurch zu verringern, dass sie ihre Körperstellung der ihres Avatars angleichen (GONZALEZ-FRANCO et al., 2020). Erklärt wurde der Effekt durch das implizite Bedürfnis der Probanden, die Lücke zwischen ihrem körperlichen und virtuellen Selbst zu schließen. Damit folgt die virtuelle Repräsentation nicht mehr (nur) den handelnden Nutzern, sondern lenkt und beeinflusst sie. Einfluss nehmen kann die virtuelle Repräsentanz der Nutzer auch auf deren Wahrnehmung der virtuellen Welt. Mit einer Veränderung von Körpermerkmalen wie der Augenhöhe, Handgröße oder Armlänge und damit - so die Annahme - einer Beeinflussung der körper- bzw. avatarbasierten Skalierung, verändert sich auch die Entfernungsschätzung in virtuellen Welten (LEYRER et al., 2011; LINKENAUER et al., 2013, vgl. Kapitel 2.3). Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die konkrete Ausgestaltung eines Avatars auch das Selbstbild mit zu beeinflussen vermag (BANAKOU et al., 2013). BIOCCA (1997) prägte diesbezüglich den Begriff der Eigenpräsenz, die er als das mentale Modell der Nutzer innerhalb der virtuellen Welt definierte, welches die Wahrnehmung des eigenen Körpers, die physiologischen und emotionalen Zustände, die wahrgenommenen Eigenschaften und die Identität umfasst. Dies unterstreicht die Bedeutung für die Entscheidung über Vorliegen und Art der virtuellen Repräsentation der Nutzer für deren Erleben und Verhalten in der virtuellen Welt.

2.3 Raumwahrnehmung

Die akkurate Wahrnehmung des virtuellen Raums und damit der Entfernungen zwischen sich und anderen ist unmittelbar verhaltensrelevant. Möchte man beispielsweise Probanden eine Straße überqueren lassen, müssen diese die Entfernung zu nahenden Fahrzeugen möglichst zutreffend einschätzen können. Ebenso werden sie ihre Geschwindigkeitseinschätzungen zumindest teilweise auf die in einer gewissen Zeit zurückgelegte Entfernung gründen. Als Raumwahrnehmung bezeichnet man die kinästhetische, akustische und visuelle Erfahrung bzw. Konstruktion von umgebendem Raum, und damit die Möglichkeit, die drei Dimensionen und die Abstände zwischen den Objekten in der Welt wahrzunehmen (GOLDSTEIN, 1997). Eine besondere Bedeutung für das Erleben und Verhalten in der (nicht nur virtuellen) Welt besitzt die egozentrische Tiefenwahrnehmung, d. h. die Wahrnehmung von

Objekten in Bezug zum Betrachter. Dadurch, dass Linsen und Display der VR-Brille für jedes Auge ein leicht unterschiedliches Bild erzeugen, wie es in der realen Welt auch infolge des lateralen Augenabstands erfolgt, entsteht im Nahbereich bis ca. 10 m der Eindruck räumlicher Tiefe. Voraussetzung dafür ist, dass der laterale Augenabstand (IPD – inter-pupillary distance) realistisch abgebildet, d. h. auf den jeweiligen Nutzer angepasst werden kann. Auf größere Entfernungen werden Gestaltungselemente der virtuellen Welt (bspw. Verdeckungen, Höhe im Sichtfeld, Unschärfe) und bewegungsinduzierte Tiefenhinweise (bspw. entfernungsabhängige Geschwindigkeit der Bewegung) wirksam (WATSON & ENNS, 2012). Eine umfassende Übersicht über den Wirkungsbereich dieser visuellen Tiefenhinweise (nah vs. fern) und die Art der räumlichen Information (absolute vs. relative Positionsbestimmung) bieten DÖRNER und STEINICKE (2019). Auch akustische Hinweisreize können die räumliche Wahrnehmung unterstützen (FINNEGAN, 2017), jedoch nur zu einem gewissen Ausmaß (SCHNEIDER et al., 2018).

Ältere Studien berichten von verzerrten Entfernungsschätzungen bei der Nutzung von VR-Brillen (LOOMIS & KNAPP, 2003; THOMPSON ET AL., 2004; WILLEMSEN et al., 2004; INTERRANTE et al., 2006, KUHL et al., 2009). Derartig verzerrte Wahrnehmungen können – bspw. mit Blick auf das eingangs genannte Beispiel der Straßenquerung – Verhaltensweisen erzeugen, die in der realen Welt nicht in dieser Art beobachtbar wären. Die bisherigen Untersuchungen, die Entfernungsschätzungen in virtuellen Welten vorwiegend mit der Methode des blinden Gehens zu einem vorab gezeigten Zielreiz untersucht haben, sprechen konsistent von einer Unterschätzung von Entfernungen, die in virtuellen Welten auftritt (THOMPSON et al., 2004; WILLEMSEN et al., 2004). Die von den Probanden geschätzte Entfernung liegt nach einer Übersicht über ältere Studien zwischen 50 % und 90 % der tatsächlichen Entfernung (RENNER et al., 2013; INTERRANTE et al., 2006; KUHL et al., 2009).

Den Grund für die teils eklatante Unterschätzung egozentrischer Entfernungen wurde bislang vor allem in den verschiedensten Unzulänglichkeiten der Abbildung virtueller Welten gesucht. Allerdings fanden sich keine überzeugenden Belege für einen bedeutsamen Einfluss von Gestaltungsmerkmalen der virtuellen Welt oder den umfassender untersuchten technischen Spezifikationen der verwendeten VR-Brillen: Weder die grafische Wiedergabetreue (THOMPSON et al., 2004), das Gewicht der

VR-Brille (WILLEMSEN et al., 2004) oder Begrenzungen des Sichtfelds (CREEM-REGEHR et al. 2005; KNAPP & LOOMIS, 2004) können hierfür verantwortlich gemacht werden, zumindest nicht isoliert, und selbst in Kombination können diese Faktoren die Entfernungsunterschätzung höchstens teilweise erklären.

Möglicherweise wird es auch zunehmend weniger bedeutsam, den Einfluss technischer Merkmale auf die Entfernungseinschätzung zu bestimmen. Neuere Studien zeigen, dass in Bezug auf die damit vorgenommene Entfernungsschätzung in virtuellen Welten die vergleichsweise neue Oculus Rift besser abschnitt als ein älteres, ungleich teureres Modell eines anderen Herstellers (CREEM-REGEHR et al. 2015; YOUNG et al., 2014), jedoch ohne dass die dafür verantwortlichen Faktoren (wie etwa die Auflösung, das Sichtfeld (Field of View, kurz: FOV, oder andere) identifiziert werden konnten. Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, die Entfernungseinschätzung durch das Bereitstellen kinästhetischer Informationen sowie durch vertraute Referenzpunkte zu unterstützen. So wirkt die aktive Bewegung in der virtuellen Welt einer Unterschätzung von Entfernungen entgegen, indem propriozeptive und vestibuläre Informationen die visuellen Hinweisreize ergänzen. Diese körperbezogenen Informationen, die aus dem aktiven Begehen der virtuellen Welt resultieren, scheinen einigen Studien zufolge mitunter sogar bedeutsamer für die Einschätzung von Entfernungen zu sein als visuelle Hinweisreize (CAMPOS et al., 2012; WALLER & RICHARDSON, 2008). Darüber hinaus wird die akkurate Einschätzung von Entfernungen durch Referenzobjekte unterstützt, die den Probanden dabei helfen, den virtuellen Raum zu vermessen (INTERRANTE et al., 2006; KELLY et al., 2017). Entspricht der virtuelle Raum einem realen, dem Betrachter bekannten Raum, so geht die Entfernungsunterschätzung deutlich zurück (INTERRANTE et al., 2006). Ebenso kann das Vorhandensein einer virtuellen Verkörperung (üblicherweise als Avatar bezeichnet) relevante Hinweisreize liefern, um Entfernungen in virtuellen Welten präziser einzuschätzen (MOHLER et al., 2010, vgl. Kapitel 2.2).

2.4 Bewegungswahrnehmung

Voraussetzung zur Orientierung und Navigation im realen wie auch im virtuellen Raum aus egozentrischer Perspektive ist die Erkennung und Interpreta-

tion von Bewegungsinformationen aus der Umwelt. Diese verändern sich mit Lage und Bewegung der Betrachter. Dazu werden die vestibulär und kinästhetisch wahrnehmbaren Eigenbewegungen der Betrachter, seien es Kopfbewegungen, Augenbewegungen oder Fortbewegung, mit den visuellen oder auch akustischen Informationen der umgebenden Außenwelt verrechnet. Aus der Interaktion der unterschiedlichen Sinneseinflüsse von Umwelt und Betrachter wird die Wahrnehmung von Position und Eigen- wie Fremdbewegung im dreidimensionalen Raum konstruiert. Die Unterscheidung von Eigen- und Fremdbewegung basiert nach LEIBOWITZ et al. (1986) auf zwei distinkten Systemen. Die Abbildung von Objektbewegungen in der Umwelt erfolgt foveal über Fixation des Objekts, während globale Veränderungen des Retinaabbildes im Abgleich mit vestibulären Informationen als Eigenbewegungen interpretiert werden. Für die Wahrnehmung der Eigenbewegung sind insbesondere die peripheren Retinabereiche verantwortlich (BRANDT et al., 1973; MCMANUS et al., 2017). Die Gesamtheit der steten Veränderung des retinalen Umweltabbildes, das in Abhängigkeit von der Bewegungscharakteristik der Betrachter entsteht, wird als optischer Fluss bezeichnet (GIBSON, 1950). Mithilfe des optischen Flusses kann Eigenbewegung als solche erkannt, die Bewegungsrichtung bestimmt und über die Geschwindigkeit des optischen Flusses auf der Netzhaut die Entfernung zu anderen Objekten abgeschätzt werden (EBD., WARREN & HANNON, 1988). Somit ist die Bewegungswahrnehmung eng verbunden mit der Raumwahrnehmung (vgl. Kapitel 2.3). Eine Begrenzung der peripheren Wahrnehmung durch VR-Brillen, bei denen das FOV noch nicht in einem der realen Wahrnehmung entsprechendem Ausmaß abgebildet wird, dürfte daher die Wahrnehmung von Umweltinformationen aus der Sichtperipherie beschränken und auf darauf aufbauende Handlungen wirken. Bei der Fahrzeugführung beispielsweise gelten die Wahrnehmung der eigenen Geschwindigkeit und damit die Geschwindigkeitswahl als vom optischen Fluss der Sichtperipherie mit beeinflusst (CAVALLO & LAURENT, 1988).

Die Wahrnehmung von Eigenbewegung muss nicht zwangsläufig auf eine tatsächliche Veränderung der Betrachterposition zurückgehen. Mitunter kann aus der Fehlattri-bution von Bewegungen in der Umwelt der fälschliche Eindruck einer Eigenbewegung entstehen, wenn statische Betrachter einen bewegten Stimulus betrachten, der einen beträchtlichen Teil

des Gesichtsfelds einnimmt. Diese visuelle Täuschung, Vektion genannt (vgl. DICHGANS & BRANDT, 1978) zeigt sich anschaulich am Beispiel des vorbeifahrenden Zuges am Nebengleis, dessen Bewegung den Eindruck hervorruft, der eigene stehende Zug bewege sich in die entgegengesetzte Richtung. Diese Täuschung kann man sich in VR-Umgebungen zunutze machen, um eine realistisch anmutende virtuelle Eigenbewegung ohne Eigenbewegung in der realen Welt zu ermöglichen (vgl. RIECKE, 2011). Die durch visuelle Vektion hervorgerufene Illusion der Eigenbewegung kann durch räumliche akustische Stimuli, die für sich genommen nur schwache Bewegung-sillusionen hervorrufen, noch verstärkt werden (KESHAVARZ et al., 2013; RIECKE et al., 2005). Vektion ermöglicht eine weitläufige Exploration virtueller Welten, ohne dass eine vergleichbar große Bewegungsfläche in der realen Welt zur Verfügung gestellt werden muss. Die physische Eigenbewegung ist folglich keine Voraussetzung für ein realistisches und immersives Erleben und Verhalten in der virtuellen Welt. Potenziell nachteilig wirkt sich der Verzicht auf selbige jedoch aus, weil die visuellen Informationen nicht von korrespondierenden Informationen des Vestibularsystems begleitet werden, und folglich zu Symptomen der sogenannten Cybersickness führen kann.

2.5 Cybersickness

Bei der Nutzung von VR-Systemen kann es zu unerwünschten Symptomen wie Blässe, Müdigkeit, Kopfschmerzen, Schwindel und Übelkeit kommen. Nach der verbreiteten, wenn auch nicht gänzlich unumstrittenen Theorie sensorischer Konflikte sind die Symptome auf die Diskrepanz unterschiedlicher Informationen aus dem visuellen und vestibulären Sinnessystem zurückzuführen. Diese gleichen denen der Reisekrankheit, die man ebenfalls durch die Theorie sensorischer Konflikte (in dem Falle durch vestibulär wahrgenommene Eigenbewegung ohne korrespondierenden visuellen Input) erklärt (REASON & BRAND, 1975; BOS et al., 2008; GRAYBIEL et al., 1968). Bei visuell induzierter Bewegungs-krankheit in künstlichen Welten spricht man von Simulator-krankheit oder Cybersickness (vgl. BROOKS et al., 2010). Das Auftreten bzw. Ausbleiben von Cybersickness wird im Zuge der Studiendokumentation selten explizit dokumentiert (vgl. SCHNEIDER & BENGLER, 2020), so dass sich schwer einschätzen lässt, ob entsprechende Symptome ausgeblieben sind oder ob sie lediglich

nicht so augenfällig waren, dass die betroffenen Probanden aus der Studie ausgeschlossen werden mussten. Nach LAWSON (2015) zeigte ein Anteil von 60 % bis 80 % der Nutzer in virtuellen Welten Anzeichen von Cybersickness, die bei etwa 15 % so stark ausfiel, dass die VR-Anwendung abgebrochen werden muss. Beim Einsatz brillenbasierter VR-Systeme in einfachen Fußgängerszenarien wurde eine Prävalenz von bis zu 11 % bis 15 % berichtet (DEB et al., 2017; MALLARO et al., 2017).

Aus der Theorie sensorischer Konflikte lassen sich Faktoren ableiten, die das Auftreten von Cybersickness dadurch begünstigen, dass sie eine starke sensorische Diskrepanz hervorrufen, bspw. indem die visuelle Vektion besonders stark ausfällt oder die erwartbaren vestibulären Informationen nur schwach oder gar nicht gegeben sind. Bestimmte Merkmale bei der Umsetzung der VR-Erfahrung verstärken das Erleben von Vektion als (illusorischer) Eindruck einer vermeintlich realistischen Eigenbewegung. Dazu gehört u. a. die Darstellung räumlicher Tiefe in der virtuellen Welt durch VR-Brillen, die zwar realistisch anmutet, aber im Vergleich zu monoskopischen Visualisierungen das Auftreten von Cybersickness begünstigen kann (KIM et al., 2014; DENNISON et al., 2016; SUWARNO et al., 2019). Dabei spielt offenbar auch die Größe des FOV der verwendeten VR-Brillen eine Rolle: Je größer das FOV, desto stärker ist die Vektion und damit die Neigung zu Cybersickness, während eine dauerhafte oder dynamische (d. h. nur während der Vor- oder Seitwärtsbewegung des Probanden erfolgende) Reduktion des FOV dem Auftreten von Cybersickness effektiv begegnen kann (REBENITSCH & OWEN, 2016; CHANG et al., 2020; DUH et al., 2001; FERNANDES & FEINER, 2016). Für sich genommen bedingt Vektion jedoch keine Cybersickness, sondern erst dann, wenn die visuellen Informationen nicht von den korrespondierenden Körperbewegungen begleitet werden. Folglich gilt eine begleitende physische Bewegung in der realen Welt als zumindest aus technischer Sicht einfaches Mittel, durch die Ergänzung um reale Eigenbewegung für kohärente Sinneseindrücke zu sorgen und somit Cybersickness zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. So kann der Einsatz von Bewegungsplattformen in Fahrsimulationen im Vergleich zu statischen Simulatoren die mit der Verwendung einer VR-Brille ausgeprägteren Symptome von Cybersickness (s. o.) abschwächen (NG et al., 2020; YEO et al., 2020). Bei Fußgängerszenarien könnte der Einsatz eines synchronen Avatars, so die (noch

nicht belegte) Vermutung von FELDSTEIN et al. (2016), für die Kongruenz visueller und vestibulärer Reize und damit für das Ausbleiben von Cybersickness verantwortlich sein.

Die zur Generierung der erforderlichen vestibulären Informationen erforderliche Eigenbewegung ist jedoch zumindest in Fußgängerszenarien nicht nur allein aufgrund des dazu erforderlichen Platzbedarfs herausfordernd in der Umsetzung. Schließlich führt nicht nur die inhaltliche Inkongruenz der Stimuli zu Cybersickness, sondern auch die Asynchronität inhaltlich durchaus kongruenter Stimuli. Als kritischer Faktor gilt daher die Latenz oder Echtzeitnähe eines VR-Systems. Bei der Bewegung durch die virtuelle Welt muss die Bewegung des Kopfes und gegebenenfalls auch des Körpers erfasst und übermittelt werden, um die Darstellung der virtuellen Welt entsprechend zu aktualisieren. Die dabei auftretende Verzögerung zwischen den Eingaben des Nutzers und der daraufhin durchgeführten Aktualisierung der virtuellen Welt wird als Latenz bezeichnet. Sie bestimmt sich in Abhängigkeit der Sensorverzögerungen und der Schnelligkeit der Datenübertragung und begünstigt das Auftreten von Cybersickness (FELDSTEIN & ELLIS, 2020; STAUFFERT et al., 2020). Einer älteren Studie zufolge scheint auch die Variabilität der Latenz problematisch zu sein. Während sich Probanden an eine konstante Latenz von 125 ms und 250 ms gewöhnten, empfanden sie eine Variabilität der Latenz als unangenehm (DRAPER et al., 2001).

Neben den oben genannten Faktoren der technischen Umsetzung der virtuellen Welt sind auch bestimmte anwendungsbezogene (z. B. Dauer) sowie personenbezogene Aspekte mit dem Auftreten bzw. Ausmaß von Cybersickness verbunden (vgl. CHANG et al., 2020; KENNEDY et al., 1989). Zum einen ist die Empfänglichkeit für Cybersickness interindividuell sehr unterschiedlich ausgeprägt, und zum anderen gibt es systematische gruppenbezogene Unterschiede, und zwar dahingehend, dass ältere und weibliche Probanden stärker von Cybersickness betroffen sind (EBD.). Die durchaus bedeutsamen interindividuellen Unterschiede im Auftreten und Ausmaß der Symptome lassen sich durch die Theorie der sensorischen Konflikte nicht erklären. Auch die Rolle weiterer personenbezogener, ebenfalls alterskorrelierter Faktoren wie bspw. das Ausmaß bisheriger VR-Erfahrungen, ist noch nicht abschließend geklärt (CHANG et al., 2020).

2.6 Resümee

Die Erlebnisqualität virtueller Erfahrungen wird durch Aspekte der verwandten, aber nicht identischen Konzepte der Immersion und Präsenz charakterisiert. Zentral ist hierbei die Nähe zu Erlebnissen der realen Welt, im Wahrnehmen und im Handeln. Dies umfasst die Vollumfänglichkeit der multisensorischen Erfahrung, deren Wiedergabetreue sowie die Möglichkeit, sich möglichst natürlich durch die virtuelle Welt zu bewegen und mit ihr zu interagieren. Virtuelle Welten mit einer überzeugenden „Als-ob“-Erfahrung können Reaktionen und Verhaltensweisen auslösen, die denen der realen Welt weitgehend entsprechen. Damit ist eine essenzielle Voraussetzung dafür geschaffen, Beobachtungen einer virtuellen Welt auf die reale Welt übertragen zu können.

Die Erlebnisqualität wird von den technischen Merkmalen des VR-Systems in erheblichem Maße geschaffen bzw. begrenzt. Dazu gehört beispielsweise die Umsetzung des Stereosehens, das eine individuelle Anpassbarkeit der VR-Brille auf den lateralen Augenabstand voraussetzt. Insbesondere sticht die Bedeutung der Größe des FOV für die Wahrnehmung von Informationen in der Sichtperipherie, zur Wahrnehmung der Eigenbewegung, aber auch für das Auftreten von Cybersickness hervor. Die Möglichkeit zur natürlichen Bewegung durch die virtuelle Welt ergänzt visuelle Informationen um propriozeptive und vestibuläre Hinweise. Dies wirkt einem sensorischen Konflikt und damit dem Auftreten von Cybersickness entgegen und unterstützt zudem die korrekte Einschätzung von Entfernungen. Eine akkurate räumliche und echtzeitnahe Erfassung der Position der Nutzer und ihrer Bewegungen ist die Voraussetzung dafür, die virtuelle Welt betrachterzentriert darzustellen und Interaktion zu ermöglichen. Räumliche und zeitliche Diskrepanzen beeinträchtigen die Erlebnisqualität und können Cybersickness oder auch ein Gefühl des Kontrollverlusts über die virtuelle Verkörperung nach sich ziehen.

3 Möglichkeiten zur technischen Umsetzung von VR-Systemen

Die virtuelle Erlebnisqualität wird, wie im vorhergehenden Kapitel erläutert, von den technischen Merkmalen des VR-Systems (bspw. Displaymerkmale wie FOV, Genauigkeit des Tracking, etc.) mit-

beeinflusst. Dies unterstreicht die Bedeutung der Auswahl von VR-Komponenten unter Berücksichtigung der damit erreichbaren Erlebnisqualität. Wie eingangs erörtert, können Funktionen eines VR-Systems durch unterschiedliche VR-Komponenten erfüllt werden. Zudem unterscheiden sich die derzeit verfügbaren Komponenten in der verwendeten Sensorik und in Umfang und Güte der gebotenen Funktionen teils erheblich voneinander. Welche VR-Komponenten und -ausführungen es gibt und worin sie sich unterscheiden, wird nachfolgend anhand einer Übersicht über aktuelle und marktreife technische Umsetzungen beschrieben. Ziel dieser Übersicht ist es, die Vielfalt der technischen Möglichkeiten und die damit verbundenen Eigenschaften aufzuzeigen. Dabei ist der Vergleich zwischen einzelnen Herstellern und Modellen nicht zielführend, so dass die Darstellung entweder generisch oder – wie im nachfolgenden Kapitel bei der Übersicht über VR-Brillen – anonymisiert erfolgt. Der Fokus liegt auf den Hardwarekomponenten und Technologien, die zur Visualisierung (VR-Brillen), zur Fortbewegung durch die virtuelle Welt und zum Tracking der Nutzer (einschließlich spezieller Gerätschaften zum Hand- und Körpertracking) erforderlich sind. Die zur finalen Umsetzung ebenfalls erforderliche Ausstattung (bspw. Rechner zur Anbindung der VR-Brille) wird hierbei nur angerissen.

Ziel der nachfolgenden Übersicht ist zum einen, aus den Unterschieden zwischen den Komponenten und Technologien die Anforderungen ableiten zu können, die man an ein zu Forschungszwecken einsetzbares VR-System stellt (s. Kriterienkatalog in Kapitel 5.3). Zum anderen soll die Wissensgrundlage geschaffen werden, um die Ergebnisse der in Kapitel 6 berichteten Expertenbefragung entsprechend einordnen zu können. Im Rahmen dieser Ergebnisbeschreibung (s. Kapitel 6.3.2 und 6.5.2) werden die nachfolgend noch separat erläuterten Komponenten zu einem Gesamtsystem zusammengefügt.

3.1 Beschreibung der Komponenten und Technologien

3.1.1 VR-Brillen

VR-Brillen ermöglichen die betrachterzentrierte Visualisierung virtueller Welten. Über die beiden Linsen und Displays wird für jedes Auge ein leicht unterschiedliches Bild erzeugt, so dass der Eindruck räumlicher Tiefe entsteht (vgl. Kapitel 2.3). Durch

die Abschottung visueller Informationen aus der realen Welt sehen die Nutzer ausschließlich die virtuellen Inhalte. Mit jeder Bewegung wird die virtuelle Szenerie auf die geänderte Betrachterperspektive angepasst, so dass ein Umherschauen in der die Nutzer gänzlich umgebenden virtuellen Welt ebenso möglich wird wie eine Bewegung durch diese Welt. Solange die Positionserfassung gewährleistet ist (vgl. Kapitel 3.1.2), können sich die Nutzer auch ohne etwaige Eingabegeräte wie bspw. Controller oder Laufbänder (vgl. Kapitel 3.1.4) durch die virtuelle Welt bewegen.

Die unterschiedlichen Hersteller von VR-Brillen bieten verschiedene Modelle an, die wiederum regelmäßig auf den neuen Stand der Technik hin angepasst werden. Dementsprechend vielfältig ist das Angebot von VR-Brillen, die sich zwar in der eingangs beschriebenen Basisfunktionalität gleichen (Betrachterzentrierung, 3D-Visualisierung, Ausblendung der realen Welt, etc.), sich aber in Umfang und Güte dieser und weiterer Funktionen teils erheblich unterscheiden. Demnach gibt es Unterschiede in der Qualität des visuellen Erlebens, dem Funktionsumfang, Art und Verfügbarkeit des Trackings und ergonomischen Aspekten. Die visuelle Erlebnisqualität bestimmt sich danach, wie wirklichkeitsgetreu das virtuelle Bild dargestellt werden kann. Mit einem größeren FOV können auch Informationen in der Sichtperipherie wahrgenommen werden. Noch liegt das FOV der meisten VR-Brillen mit diagonal ca. 110° ($\pm 20^\circ$, vgl. Tabelle 1) zumeist erheblich unter dem FOV, das dem Sichtfeld eines gesunden Menschen entspricht (200° horizontales FOV gemäß HARRINGTON, 1971; BLISSING & BRUZELIUS, 2018).

Eine hohe Auflösung trägt dazu bei, das Bild, das sich in kurzer Entfernung zum Auge befindet, möglichst unverpixelt erscheinen zu lassen und auch Details erkennbar zu lassen. Auch hier gibt es erhebliche Unterschiede zwischen VR-Brillen, wie aus Tabelle 1 hervorgeht. Um in Bezug auf die damit erreichbare Bildschärfe aussagekräftig zu sein, muss die Anzahl der Pixel noch ins Verhältnis zur Fläche und zur Entfernung zum Auge gesetzt werden. Eine VR-Brille mit größerem FOV bedarf folglich auch einer größeren Anzahl an Pixeln, um eine vergleichbare Bildschärfe erreichen zu können. VR-Brillen erreichen in der Regel nicht einmal ansatzweise das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges (CLARK, 2017, zitiert nach FELDSTEIN & DYSZAK, 2020).

Die Bildqualität wird zudem von der Anzahl der pro Sekunde ausgegebenen Einzelbilder beeinflusst. Je höher diese Bildwiederholfrequenz ausfällt, desto glatter erscheint das Bild. Vormalig wurde ein Flackern des Bildes mit Cybersickness in Verbindung gebracht, doch inzwischen dürfte sie aufgrund der höheren Performanz aktueller VR-Brillen kein kritischer Faktor mehr sein (REBENITSCH, 2015).

Eine wichtige Voraussetzung für ein klares Bild und korrekte Tiefeninformationen ist es, den individuellen Augenabstand (kurz: IPD für interpupillary distance) der Nutzer zu berücksichtigen. VR-Brillen bieten daher die Möglichkeit zur Nachjustierung, die entweder manuell oder – bei VR-Brillen mit integriertem Eye-Tracking – automatisch erfolgen kann. Etwaige Fehljustierungen ermüden die Augen und führen zu Kopfschmerzen (BEST, 1996). Die Möglichkeit zur Einstellung bieten alle (zumindest die in Tabelle 1 aufgeführten) Modelle binnen eines ungefähren Bereichs von 55 – 75 mm (± 2 mm), der für die Mehrheit der Erwachsenen genügt. Nicht durchführbar ist jedoch eine Anpassung auf Nutzer mit extrem engen (ab 45 mm) oder weiten Augenabständen von bis zu 80 mm (DODGSON, 2004).

Um die virtuelle Welt aus egozentrischer Perspektive darstellen zu können, müssen die Kopfbewegungen möglichst akkurat und unvermittelt erfasst werden. Dazu sind in der Brille Sensoren verbaut, die entweder allein oder im Zusammenspiel mit externen Geräten dafür sorgen, dass sich Nutzer in der virtuellen Welt umschaun und umhergehen können und ihnen die virtuelle Welt stets aus ihrer gegenwärtigen Perspektive dargeboten wird. Die unterschiedlichen Techniken, darunter das in Tabelle 1 aufgeführte Inside-Out-Tracking – kamerabasiert oder mittels Lighthouse-Tracking (markerbasiert) – sind in Kapitel 3.1.2 erläutert. Neben der Trackingtechnik unterscheiden sich VR-Brillen auch in der Verfügbarkeit der darüberhinausgehenden Trackingfunktionen (Hand- und Eyetracking). Manche Modelle bieten eine integrierte oder aber über ein Zusatzmodul verfügbare Erfassung der Augenbewegungen (Eye-Tracking). Die Erkennung von Augenbewegungen ermöglicht neben der genannten automatischen Anpassung des IPD eine höhere Bildschärfe in dem Bereich, der gerade fokussiert wird. Damit kann eine höhere visuelle Erlebnisqualität bei geringerer Rechenleistung ermöglicht werden. Eye-Tracking ist zudem die Voraussetzung zur blickbasierten Auslösung von Interaktionen und zur Ableitung von Blickbewegungsmaßen als abhängige Variablen. Über das ebenfalls von vielen VR-Bril-

	Kabelgebundene VR-Brillen					Autarke VR-Brillen		
	Brille 1	Brille 2	Brille 3	Brille 4	Brille 5	Brille 6	Brille 7	Brille 8
Auflösung (pro Auge)	1400 x 1600	2448 x 2448	1440 x 1600	2880 x 2720	3840 x 2160	1832 x 1920	3840 x 2160	2448 x 2448
FOV	110°	120°	130°	115°	200°	90°	101°	120°
Bildwiederhol- frequenz	90 Hz	120 Hz	144 Hz	90 Hz	110 Hz	72 Hz	75 Hz	90 Hz
Autarkie	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Positionstra- cking	Lighthouse	Lighthouse	Lighthouse	Lighthouse, Kamera	Lighthouse	Kamera	Kamera	Kamera
Gewicht	550 g	855 g	809 g	980 g	470 g	503 g	692 g	785 g
Eyetracking	In einem ähnlichen Modell ver- fügbar	nein	nein	ja	Zusatzmo- dul erforder- lich	nein	In einem ähnlichen Modell ver- fügbar	nein
Handtra- cking	ja	ja	ja	ja	Zusatzmo- dul erforder- lich	ja	nein	ja
Kopfhörer	ja, demon- tierbar	ja, demon- tierbar	ja	3,5 mm Klin- kenan- schluss	optional er- hältlich	nein	nein	ja

Tab. 1: Merkmalsübersicht aktueller VR-Brillen laut Angaben der Hersteller

len realisierbare Handtracking lassen sich die Finger- und Handbewegungen der Nutzer nachvollziehen, solange diese im Erfassungsbereich der an der VR-Brille angebrachten Kameras liegen. Somit lassen sich Handbewegungen (bspw. Greifbewegungen, Eingaben) ohne externe und möglicherweise intrusive Gerätschaften (bspw. Controller oder Datenhandschuhe) realisieren.

Auch wenn akustische Informationen die Erlebnisqualität zweifellos unterstützen (vgl. Kapitel 2.1), spielt die Akustik bei der Diskussion um die Güte-merkmale von VR-Brillen und -systemen eine untergeordnete Rolle. Kopfhörer gehören nicht zwangsläufig zum Lieferumfang bei VR-Brillen, oder lassen sich in manchen Fällen mühelos abmontieren. In der Forschungspraxis werden sie mitunter durch externe Kopfhörer oder Lautsprechersysteme ergänzt bzw. ersetzt, mutmaßlich um die Außenwelt akustisch abzuschotten (vgl. Kapitel 4). Sind Kopfhörer integriert, so geben Lautsprecher an bzw. auf den Ohren den Klang passend zur jeweiligen Position der Nutzer in der virtuellen Welt aus.

Neben den unmittelbar erlebnisbezogenen Kriterien unterscheiden sich VR-Brillen auch in Merkmalen, die mit einem möglichen Diskomfort und damit einer Beeinträchtigung der Erlebnisqualität einhergehen. Dazu gehören beispielsweise das Gewicht der Brille sowie die Möglichkeit, sich ohne Anbindung an ein Kabel frei bewegen zu können. Die Möglichkeit

zur kabellosen Nutzung ist bei den autarken VR-Brillen oder (bei nur wenigen kabelgebundenen Modellen) durch Einsatz eines Wireless Adapters gegeben.

Zwischen den VR-Brillen gibt es teils erhebliche Preisunterschiede von wenigen hundert bis zu mehreren tausend Euro. Dazu kommen je nach Modell noch die Kosten für externe Gerätschaften, um das Tracking realisieren zu können sowie die Anschaffung eines externen Rechners mit hochwertiger Grafikkarte. Die preiswerteste Lösung stellen demnach die Modelle dar, die autark sind, d. h. ohne Anbindung an einen PC oder weitere Zusatzausrüstung funktionieren. Diese bieten außerdem den Vorteil, mobil und außerhalb eines mit externen Zusatzgeräten ausgestatteten Raums einsetzbar zu sein. Da jedoch die eingebauten Prozessoren weniger leistungsfähig sind als die für den Betrieb empfohlene Hardware, erreicht die Bildqualität autarker Modelle nicht das gleiche Niveau wie bei Anbindung an einen externen Rechner. Seitens der Hersteller werden Begrenzungen des überwachten Bereichs und damit der verfügbaren Bewegungsfläche genannt (Play Area von 3 x 3 m, 9 x 9 m, 30 x 33 m, etc.), die jedoch zumindest bei bestimmten Modellen anwenderseitig aufgehoben werden können.

Nachfolgend werden verschiedene aktuelle Modelle¹ in Tabelle 1 vergleichend gegenübergestellt. Angesichts der Vielzahl verfügbarer Modelle be-

¹ Bezogen auf das Jahr 2021

schränkt sich die vorliegende Übersicht auf diejenigen, die im Zuge der im vorliegenden Projekt durchgeführten Expertenbefragung für den gegebenen Anwendungsfall als geeignet erachtet wurden (vgl. Kapitel 6). Ziel der Übersicht ist die Darstellung des aktuellen Stands der Technik sowie der technischen Unterschiede zwischen verschiedenen Brillentypen (kabelgebunden vs. autark) und nicht der Vergleich zwischen einzelnen Herstellern und deren Modellen. Die Darstellung erfolgt daher in anonymisierter Form.

3.1.2 Trackingtechnologien

Die Erfassung der Kopfbewegung der Nutzer ist die essenzielle Voraussetzung dafür, die virtuelle Welt betrachterzentriert darstellen zu können. Selbst bei einfachen Anwendungen im Sitzen muss die Darstellung der virtuellen Welt unmittelbar angepasst werden, sobald die Nutzer ihren Kopf neigen, nach oben/unten oder rechts/links schauen. Diese vergleichsweise reduzierte Form des Trackings der Kopforientierung übernehmen inertialbasierten Sensoren (vgl. die nachfolgenden Erläuterungen) innerhalb der VR-Brille. Darüberhinausgehende Bewegungen, bei denen sich die Position des Kopfes im Raum verändert – sei es durch Bewegungen nach vorne bzw. hinten oder durch Bewegung im Raum – erfordern jedoch weitergehende Maßnahmen zur Positionsverfolgung.

Mitunter ist es wünschenswert, nicht nur die Position des Kopfes zur betrachterzentrierten Visualisierung zu ermitteln, sondern darüber hinaus eine virtuelle Verkörperung des Nutzers zu schaffen – entweder um die Präsenz zu steigern oder um die Interaktion mit virtuellen Objekten zu ermöglichen (s. Kapitel 2.2). Simple Modelle, die allein auf Basis der Position der VR-Brille eine virtuelle Repräsentation der Nutzer erzeugen, können Informationen zu Lage und Bewegung der Extremitäten oder des Oberkörpers nicht realistisch abbilden. Je nach Anwendungsfall wird daher das Tracking einer Hand (bzw. beider Hände) oder des gesamten Körpers erforderlich. Zur Positionsverfolgung und zum Hand- bzw. Körpertracking können unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen, die oftmals den Einsatz zusätzlicher Gerätschaften erfordern. Man unterscheidet zwischen

- inertialbasiertem Tracking zur Erfassung der Kopffrotation (in der VR-Brille verbaut),

- magnetischem und mechanischem Tracking, das alleine oder in Verbindung mit optischen und inertialbasierten Verfahren zum Tracking von Händen bzw. Körper eingesetzt wird,
- sowie verschiedenen Verfahren des optischen Trackings, auf das alle VR-Brillen zur Ermittlung der Kopfposition im Raum zurückgreifen.

Die Technologien und ihre Unterschiede werden nachfolgend erläutert.

Inertialtracker messen Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen, um daraus die relative Position und Orientierung eines Objekts zu ermitteln. Dafür werden Inertialmesseinheiten (IMUs) verwendet, die eine Kombination aus Gyroskop, Magnetometer und Beschleunigungssensor enthalten. Ähnlich wie bei den nachfolgend erläuterten optischen Trackern wird mit steigender Anzahl der Sensoren das Tracking detailgetreuer. Durch die fehlende Möglichkeit zur absoluten Positionsbestimmung, wie sie bei den optischen Systemen gegeben ist, treten jedoch mit der Zeit zunehmende Messungenauigkeiten (die sogenannte Drift) auf. Dafür sind Inertialtracker klein, leicht, vergleichsweise präzise und können oft aktualisiert werden, so dass sie eine hohe Echtzeitnähe ermöglichen. Auch die beim optischen Tracking möglichen Verdeckungen treten nicht auf. Trotz der beschriebenen Akkumulation der Fehler durch die Drift kommen Inertialtracker oft zur Anwendung, sei es zur Erfassung der Kopffrotationen in VR-Brillen oder beim Körpertracking mit bzw. ohne unterstützendes optisches Tracking (vgl. Tabelle 1).

Beim **magnetischen Tracking** ist das zu trackende Objekt mit Sensoren ausgestattet, die Änderungen in dem von einer Quelle generierten Magnetfeld erfassen und somit die eigene Position und Orientierung bestimmen können. Eingesetzt wird diese Technologie mitunter zum Tracking der Controller, die somit auch außerhalb des Sichtfelds der VR-Brille erkannt werden können. Mit zunehmendem Abstand zwischen Messpunkt und Basisstation nimmt die Stärke des Magnetfelds ab. Ein Vorteil des magnetischen Trackings ist die hohe Präzision der Messung sowie die hohe Aktualisierungsrate und geringen Latenzen. Außerdem gibt es im Gegensatz zum optischen Tracking keine Probleme mit Sichtverdeckungen. Nutzer mit Herzschrittmachern und anderen medizinischen Implantaten, die empfindlich auf elektromagnetische Felder reagieren könnten, sollten diese Art von Trackern hingegen nicht verwenden. Ein Nachteil ist auch die ver-

gleichsweise hohe Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen sowie ferromagnetischen Materialien (KITAGAWA & WINDSOR, 2012). Zudem nimmt die Genauigkeit der Messung mit der Entfernung ab. Daher wird magnetisches Tracking vergleichsweise selten eingesetzt.

Mechanisches Tracking wird mittels eines Exoskeletts durchgeführt, das die jeweiligen Winkel an den Körpergelenken erfasst. Es gilt als vergleichsweise robust, da es weder für elektromagnetische Störungen noch für visuelle Überdeckungen anfällig ist. Das bereits beim inertialbasierten Tracking beschriebene Problem des Drifts besteht jedoch auch hier, da vor allem bei schnellen Bewegungen des Objekts (z. B. bei Sprüngen) Abweichungen zwischen der gemessenen und der realen Position entstehen können. Zudem sind mechanische Systeme vergleichsweise unkomfortabel und in ihrer physischen Struktur anfälliger für Beschädigungen.

Beim **optischen Tracking** werden Kameras am oder um das Objekt (d. h. die VR-Brille oder den menschlichen Körper) herum angebracht, um dessen Position und Ausrichtung zu bestimmen. Diese auf stereoskopischem Sehen beruhende Methode verwendet den Perspektivunterschied zwischen verschiedenen Kameras, um die Entfernung des zu trackenden Objekts zu ermitteln. In Abhängigkeit von der Positionierung der Kameras (am Objekt vs. in der Umgebung des Objekts) wird zwischen Outside-In-Tracking und Inside-Out-Tracking unterschieden. Beim Outside-In-Tracking werden Kameras im Raum platziert, um die Position von Markierungen auf dem zu trackenden Gerät, wie z. B. einer VR-Brille oder den Controllern, zu verfolgen. Mehrere Kameras ermöglichen verschiedene Ansichten derselben Markierungen, und diese Überlappung ermöglicht genaue Messungen der Geräteposition. IR-LEDs an der VR-Brille und den zugehörigen Controllern können durch externe Kameras in der Umgebung erkannt und verortet werden. Diese Methode ist vergleichsweise ausgereift und sehr akkurat. Ein weiterer Vorteil ist die im Vergleich zu den nachfolgend erläuterten Inside-Out-Systemen geringere Latenz. Einsatz findet die mitunter recht hochpreisige Technologie daher u. a. beim Motion-Capturing zur Erschaffung digitaler Akteure in Filmen und Videospiele. Die heute verfügbaren VR-Brillen (s. Tabelle 1) greifen zum Positionstracking auf das Inside-Out-Tracking zurück.

Beim Inside-Out-Tracking befinden sich die Kameras auf dem zu trackenden Objekt und schauen da-

her aus dessen Sicht „nach außen“ in verschiedene Richtungen, um möglichst die gesamte Umgebung zu erfassen. Inside-Out-Tracking kann mit oder ohne unterstützende Markierungen als Referenzpunkte, nach denen die Kameras zur Positionsermittlung suchen, erfolgen. Das Lighthouse-System verwendet als Marker die sogenannten Lighthouse-Stationen, die im Raum installiert sind und Infrarotlicht-Laser aussenden. Sensoren an der VR-Brille, den Controllern oder am Körper befestigten Trackern können aus der zeitlichen Differenz, mit der die Laserstrahlen auftreffen, die eigene Position und Orientierung ermitteln. Ein markerloses Tracking (kamerabasiertes Inside-Out-Tracking), auf das autarke VR-Brillen zurückgreifen, erfordert keine Zusatzgeräte in der Umgebung. Stattdessen werden ausschließlich die natürlichen Merkmale der Umgebung zur Bestimmung von Position und Orientierung der VR-Brille genutzt. Kameras an der VR-Brille erstellen eine räumliche Karte ihrer Umgebung und ermöglichen es, die Position der VR-Brille im Raum zu bestimmen. Dabei kommen komplexe Merkmalerkennungsalgorithmen zum Einsatz. Markerloses Tracking hat unter anderem den Vorteil, dass der nutzbare Raum nicht auf den von externen Gerätschaften (z. B. Lighthouse-Stationen) überwachten Bereich begrenzt ist. Nachteilig sind die zumeist größeren Latenzen im Vergleich zu Outside-In-Systemen sowie die höhere Prozessorauslastung auf dem zu trackenden Objekt. Zudem ist die Genauigkeit des Trackings geringer als bei Verwendung des markerbasierten Inside-Out-Systems.

Vorteil des optischen Trackings ist, dass es eine hohe Genauigkeit (im Vergleich zum inertialbasierten Tracking) bei überschaubaren Kosten (insbesondere Inside-Out-Tracking) bietet, und zwar (im Gegensatz zum magnetischen Tracking) auch über den Nahbereich hinaus bietet. Daher greifen alle in Tabelle 1 dargestellten VR-Brillen zum Tracking der Position auf ein Inside-Out-Tracking – das markerbasierte Lighthouse-System oder das kamerabasierte autarke Tracking – zurück. Für eine hochakurate Genauigkeit auf sehr begrenztem Raum (bspw. Erfassung der Handbewegungen von Chirurgen) wäre hingegen ein magnetisches Tracking die bessere Wahl.

Nachteile des optischen Trackings sind der hohe Rechenaufwand, der Latenzen, d. h. eine verzögerte Darstellung realer Bewegungen in der virtuellen Welt und damit Cybersickness (vgl. Kapitel 2.5) begünstigen kann, sowie eine mögliche Verdeckung des Sensors. Letzterem kann begegnet werden

durch eine Erhöhung der Anzahl der Sensoren am Objekt oder der Anzahl der Lichtprojektoren aus verschiedenen Richtungen, durch das Vorhandensein erkennbarer Referenzpunkte im Raum (beim markerlosen Tracking), oder die (noch) seltene Kombination beider Techniken in einer VR-Brille. Mit diesen Maßnahmen ist die Verdeckungsanfälligkeit optischer Verfahren besser beherrschbar als die Messabweichung inertialbasierter Sensoren oder die Anfälligkeit magnetischen Trackings für ferromagnetische Störungen.

Um die spezifischen Stärken einer bestimmten Technologie zu nutzen und gleichzeitig deren Nachteile auszugleichen, werden unterschiedliche Trackingtechnologien kombiniert. Ein Beispiel für dieses **hybride Tracking** ist die Kombination eines inertialbasierten Trackers (nur relative Positionsveränderung bei hoher Aufzeichnungsrate) mit einem optischen Tracker (absolute Positionsbestimmung bei niedriger Aufzeichnungsrate) zur Verringerung des Drifts. Dabei können die Informationen aus dem Inertialtracker als Interpolation zwischen zwei gemessenen Werten des optischen Trackings dienen. Eine andere Möglichkeit bietet die Kombination von verdeckungsempfindlichen mit verdeckungsunempfindlichen Trackern. Wenn die Markierungen verdeckt sind, können die Daten des Inertialtrackers verwendet werden, um die Position zu schätzen, bis die Markierungen wieder erkennbar sind. Aktuell wird hybrides Tracking beispielsweise bei vielen ursprünglich rein kamerabasierten Trackern verwendet, die durch inertielle Trackingsensoren ergänzt werden.

3.1.3 Hand- und Körpertracking

Das Tracking der Hände ermöglicht deren Darstellung in der virtuellen Welt und damit auch die Interaktion mit Objekten, bspw. zum Greifen, für Eingaben auf Geräten oder zur Gestenerkennung. Dies kann über Controller, ein in der VR-Brille integriertes Handtracking oder Datenhandschuhe erfolgen. Controller ermöglichen die Interaktion mit virtuellen Objekten mittels artifizierlicher Eingaben per Touchpad oder Knopfdruck. Manche Modelle können mittels Vibrationen auch ein haptisches Feedback bieten. Inzwischen bieten viele VR-Brillen eine kamerabasierte Erfassung der Hände an, so dass natürliche, nicht über Gerätschaften vermittelte Interaktionen möglich werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Hände im Erfassungsbereich der in die Brille integrierten Kameras sind. Eine teurere, aber robustere

Erfassung der Hände bzw. Finger zur natürlichen Interaktion bieten Datenhandschuhe. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Freiheitsgrade und damit dem Detailgrad, in dem deren Positionen erfasst werden. Dabei erfordert eine vollständige Abbildung der Bewegungsmöglichkeiten der menschlichen Hand 23 Freiheitsgrade (engl. DoF – degree of freedom) – vier für jeden Finger und den Daumen sowie drei im Handgelenk (MANSOR et al., 2017).

Darüber hinaus können Datenhandschuhe je nach Modell auch haptische Informationen an ihre Nutzer übermitteln, um sie die Berührung von virtuellen Objekten möglichst so spüren zu lassen, wie es bei der Berührung realer Objekte der Fall wäre. Sie werden aufgrund ihres technischen Aufbaus in unterschiedliche Kategorien eingeteilt (PERRET & POORTEN, 2018). Die herkömmliche Bauweise besteht demnach aus einem flexiblen Stoffhandschuh mit entweder eingewebten oder außen angebrachten Sensoren bzw. Aktuatoren. Mitunter wird nicht die komplette Hand vom Stoff umfasst, sondern nur die Bereiche, in denen sich die technischen Bauteile befinden. Bei manchen Handschuhen sind die Fingerkuppen nicht von Stoff umfasst, um bspw. Touchscreenbedienungen zu vereinfachen. Die komplexeste Variante sind Exoskeletthandschuhe, bei denen eine gelenkartige Struktur über die Hand des Benutzers gelegt wird, um Kräfte auf die Finger zu übertragen (vgl. das nachfolgend erläuterte Force Feedback). Befestigt werden sie am Handrücken, der Handinnenfläche oder direkt an den Fingern.

Beim haptischen Feedback unterscheidet man zwischen Force Feedback und taktilem Feedback. Taktiler Feedback wirkt auf der Haut und soll bestimmte Empfindungen hervorrufen, beispielsweise ein Gefühl für Form, Texturierung oder Materialeigenschaften des virtuellen Objekts, das gerade berührt wird. Kommerziell eingesetzte Systeme erzielen taktiles Feedback über Vibrationen an Fingerkuppen oder der Handinnenfläche. Die Frequenzen können der Anwendung entsprechend angepasst werden. Force Feedback hingegen lässt den Eindruck von bestimmten Kräften (Gewicht, Beschleunigungen, Widerstand), die auf die Hand oder einzelne Finger wirken, entstehen. Man unterscheidet zwischen aktivem und passivem Force Feedback. Bei ersterem wird auf die Finger eine Kraft ausgeübt und diese somit zu einer Bewegung gezwungen. Um eine Verletzung durch eine zu hohe aufgebrauchte Kraft zu verhindern, wird die Kraft zumeist bei 10 N gedeckelt. Passives Force Feedback hin-

gegen zielt darauf ab, bestimmte Bewegungen des Nutzers zu verhindern, indem die entsprechende Kraft nur aufgebracht wird, wenn die Nutzer ihre Finger in eine bestimmte Richtung zu bewegen versuchen. Eine Klassifizierung von Datenhandschuhen kann auch auf Basis der nachfolgend dargestellten Technologien zum Tracking, d. h. zur Erfassung der Handbewegung vorgenommen werden:

- **Inertial Measurement Unit (IMU):** Eine IMU besteht aus einem 3-Achsen-Beschleunigungssensor, einem 3-Achsen-Gyroskop sowie manchmal zusätzlich noch aus einem ebenfalls 3-achsigen Magnetometer. Die bereits in Kapitel 3.1.2 beschriebene Drift-Problematik trifft ebenfalls für Datenhandschuhe zu. IMUs sind klein, leicht und kostengünstig und werden daher oft in Kombination mit anderen Sensoren eingesetzt.
- **Biegesensoren:** Biegesensoren verändern ihren elektrischen Widerstand, wenn sie gekrümmt oder gedehnt werden. Im Gegensatz zu IMUs tritt keine Drift auf, dafür sind sie vergleichsweise empfindlich und besitzen eine kürzere Lebensdauer.
- **Hybride Ansätze:** Die meisten aktuell verfügbaren Handschuhe kombinieren unterschiedliche Technologien, um die jeweiligen Schwächen der einzelnen Technologien zu minimieren. So ist eine gemeinsame Verwendung von IMU und Biegesensoren in vielen Handschuhen implementiert. Auch optische Trackingverfahren (kamerabasiertes Inside-Out-Tracking mittels VR-Brille oder markerbasiertes Outside-In-Tracking) kommen ergänzend zum Einsatz.

Oftmals möchte man sich beim Tracking nicht nur auf die Hände beschränken, sondern braucht eine ganzheitliche Erfassung der Nutzer, um deren Bewegungen nachverfolgen zu können. Dies wird beispielsweise eingesetzt, um menschliche Bewegungen auf Animationen in Filmen oder Spielen zu übertragen. Auch für den Einsatz in verkehrsbezogenen Forschungsbereichen gäbe es denkbare Anwendungen für derartige nicht echtzeitnahe Erfassungen, beispielsweise zur Identifikation körperbezogener Hinweisreize zur Intentionserkennung bei Fußgängern (bspw. Straßenquerung). Davon abgesehen dürfte jedoch der Hauptanwendungszweck des Körpertrackings die echtzeitnahe Abbildung der tatsächlichen anstelle der auf Basis der Position der VR-Brille geschätzten Körperbewegungen der Nutzer in der virtuellen Welt zur Erhöhung der Präsenz sein. In Abhängigkeit von der erforder-

lichen Genauigkeit des Körpertrackings und dem verfügbaren Budget gibt es hierfür unterschiedliche Möglichkeiten. Sollte die Erfassung von Rumpf und Extremitäten ohne hochdetaillierte Abbildungen (bspw. Gelenkstellungen) genügen, bieten simple, mittels Gurten am Körper befestigbare Tracker, die originär zur Befestigung an realen Gegenständen (bspw. am Tennisschläger oder der Waffentatze) entwickelt wurden, um diese in der virtuellen Welt verorten zu können, eine einfache und kostengünstige Lösung. Je ein Tracker pro Fuß gibt Auskunft über Schritte und Schrittlänge, während es ein weiterer Tracker an der Hüfte ermöglicht, die Ausrichtung des Körpers nicht automatisch mit der Orientierung des durch die VR-Brille getrackten Kopfes gleichzusetzen. Gegebenenfalls ersetzen zwei weitere Tracker an den Armen die Verortung der Hände durch die Controller. Die so eingesetzten Tracker werden in Verbindung mit dem eingangs erläuterten Lighthouse-System verwendet (s. Kapitel 3.1.2) und können von diesem geortet werden.

Darüber hinaus gibt es verschiedene dedizierte Systeme zum Körpertracking, die sich unter anderem in den eingangs erläuterten Technologien unterscheiden. Dabei dominiert das inertialbasierte Tracking ohne bzw. mit Ergänzung durch optisches Tracking in den hochpreisigen Systemen (hybrides Tracking). Höhere Sensorzahlen und Aufzeichnungsraten sorgen für eine detailliertere räumliche und zeitliche Auflösung. Die Reichweite liegt teils deutlich über der üblichen Raumgröße.

3.1.4 Fortbewegung durch die virtuelle Welt

Ein aktives Erleben und Handeln (in) der virtuellen Welt setzt voraus, dass man sich in der virtuellen Welt bewegen kann. Autofahren ist hierbei im Gegensatz zum zu Fuß gehen bereits in der realen Welt eine vermittelte Form der Fortbewegung über Eingabegeräte. Diese vermittelte Fortbewegung wird in virtuellen Versuchsumgebungen entsprechend übernommen.

3.1.4.1 Fortbewegung im Fahrsimulator

Die zentralen Eingabegeräte zur Steuerung eines Pkw – Lenkrad und Pedalerie – finden sich in nahezu allen Fahrsimulatoren wieder (WYNNE et al., 2019). Insgesamt scheint es kaum inhaltliche oder ökonomische Gründe für die Nutzung alternativer Eingabegeräte zu geben. Ausnahmen stellen die bei Spielekonsolen zur privaten Nutzung üblichen

Controller dar, sowie die Erforschung alternativer Konzepte zur Steuerung eines Pkw bspw. mittels Joystick, so u. a. im Kontext des automatisierten Fahrens (ANDONIAN et al., 2003; LARGE et al., 2017). Davon abgesehen liegen die Unterschiede im Aufbau von Fahr simulatoren jedoch vorrangig im Nachbau der Fahrzeugumgebung (keine, Sitzkiste, Karosserie), ggf. unter Einsatz einer Bewegungsplattform, und der Visualisierung virtueller Welten (bspw. ein Bildschirm vs. Rundumprojektionen, s. WYNNE et al., 2019, die sich durch Anbindung einer VR-Brille ersetzen lassen). Die zentralen Eingabegeräte hingegen, darunter das Lenkrad (oft ein für Spieleanwendungen entwickeltes) und Pedalerie (in seltenen Fällen auch mit Schaltung) bleiben jedoch gleich (vgl. Tabelle 3 in Kapitel 4). Unterschiede bestehen in der Art ihrer Ansteuerung und ihrer Belegung mit zusätzlichen Funktionen. Die Art der Ansteuerung entscheidet darüber, wie stark das Fahrzeug bei Betätigung des Gas- und Bremspedals beschleunigt bzw. verlangsamt und beeinflusst zudem das Lenkverhalten und die taktile Rückmeldung des Lenkrads in Abhängigkeit von den Merkmalen des virtuellen Fahrzeugs und der virtuellen Straße. In einfachen Simulatoren ist das dadurch erzeugte Fahrgefühl in der Regel noch weit von dem realen Fahrerleben entfernt (JAMSON, 2011; WYNNE et al., 2019).

Die Belegung der Eingabegeräte mit zusätzlichen Funktionen ist ebenfalls kein Aspekt der Fortbewegungstechnik als vielmehr ein Gestaltungsaspekt, der bei Assistenzfunktionen zur Spurhaltung, zur Geschwindigkeitsbefolgung (bspw. durch aktive Lenkräder oder Veränderung des zur Beschleunigung aufzuwendenden Pedaldruck, s. ROSIER, 2019; SCHUMANN et al., 1992) oder im Rahmen des automatisierten Fahrens erforscht wird (bspw. die Entkopplung des Lenkrads während der automatisierten Fahrt, s. KERSCHBAUM et al., 2014).

Da der Fokus des vorliegenden Berichts auf der Untersuchung von Fußgängerverhalten in VR liegt (s. Kapitel 1.2), werden die Gestaltungsmöglichkeiten von Fahrsimulationen nachfolgend nicht vertiefend betrachtet.

3.1.4.2 Fortbewegung als Fußgänger

Im Gegensatz dazu gibt es bei dem Erleben der virtuellen Welt aus Fußgängerperspektive sehr unterschiedliche Konzepte, die Bewegung durch die virtuelle Welt zu realisieren. Diese reichen von sehr artifiziellen Ansätzen hin zur teilweise oder gänzlich

natürlichen Gehbewegung. Neben der Natürlichkeit der Gehbewegung unterscheiden sich die Fortbewegungsmöglichkeiten auch in der Größe der virtuellen Welt, die damit erfahrbar wird, sowie den dafür erforderlichen Techniken oder Gerätschaften. Bei den unterschiedlichen Herangehensweisen, die Bewegung von Fußgängern in der virtuellen Welt umzusetzen, lässt sich zwischen bewegungsbasierter, raumbasierter, controllerbasierter sowie teleportationsbasierter Fortbewegung unterscheiden (BOLETSIS & CEDERGREN, 2019).

Teleportationsbasierte Fortbewegung:

Teleportationsbasierte VR-Fortbewegungstechniken nutzen künstliche Interaktionen des Benutzers. Die Nutzer zeigen mittels Controller oder einer definierten Geste auf die Stelle, an der sie sich in der virtuellen Welt befinden möchte, und der virtuelle Standpunkt wird unverzüglich an diese Position versetzt. Somit vollzieht sich die Eigenbewegung in der virtuellen Welt ohne Vektion. Dies hat den Vorteil, dass man einen wesentlichen Risikofaktor für das Auftreten von Cybersickness eliminiert (s. Kapitel 2.5). Dafür verzichtet man auf die für Verhaltensstudien bedeutsame Möglichkeit, Verhaltensmaße aus der Eigenbewegung ableiten zu können.

Controllerbasierte Fortbewegung:

Hierbei greifen die Nutzer auf eine Art von Controller zurück, um sich in der virtuellen Welt zu bewegen. Dies kann mittels eines einfachen Joysticks, eines Gamepads, einer Tastatur, Maus oder einem Trackball geschehen. Als menschlichen Joystick bezeichnet man die Variante, bei der Nutzer auf einer Sensormatte stehen und sich mittels Neigungen des Körpers nach vorne bzw. hinten und zur Seite bewegen. Auf ähnliche Weise funktionieren spezielle Stühle, die Rotationsbewegungen und Neigungen in Bewegungen in der virtuellen Welt übersetzen (NGUYEN-VO et al., 2019). Auch können mittels VR-Brille erfassbare Kopfbewegungen die gewünschte Bewegungsrichtung durch die virtuelle Welt anzeigen, wobei die Geschwindigkeit des Benutzers zumeist vorgegeben wird.

Bewegungsbasierte Fortbewegung:

Bewegungsbasierte Techniken nutzen physische Bewegungen des Benutzers zur Fortbewegung in der virtuellen Welt. Die darunter subsumierten, insgesamt sehr heterogenen Methoden reichen von abstrakten Bewegungen hin zu einer (weitgehend) normalen Gehbewegung. Als abstrakte Bewegungen wären beispielsweise Armbewegungen der Nutzer einzuordnen, die mit Bewegungssensoren (z. B.

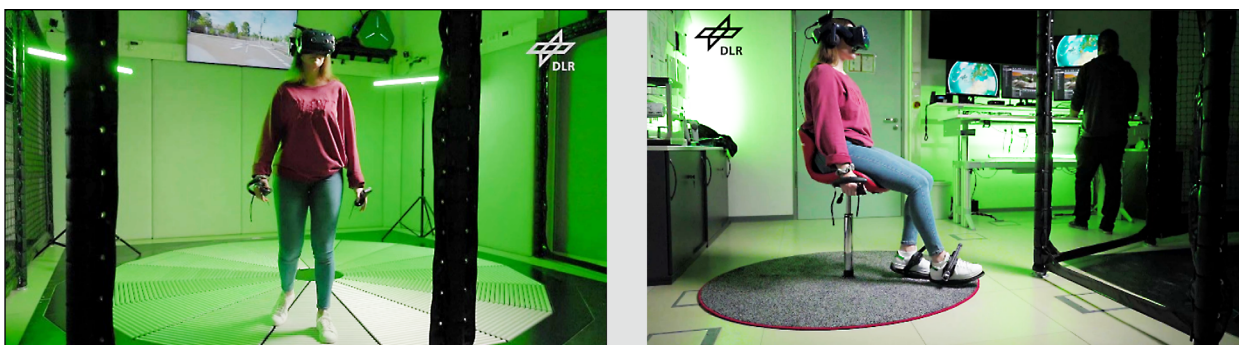


Bild 2: Einsatz eines omnidirektionalen Laufbands (links) und der Sensorschuhe (rechts) mit einer VR-Brille in der Fußgängersimulation des DLR (Quelle: DLR)

IMUs) oder mittels optischem Tracking erfasst und mit den ihnen zugeordneten Bewegungsarten verknüpft werden. Eine größere Nähe zur normalen Gehbewegung bieten Formen des Auf-der-Stelle-Tretens, bei denen die Nutzer mehr oder minder schrittartige Bewegungen ausführen, ohne sich physisch von der Stelle zu bewegen. Zur Erfassung der Gehbewegung werden zusätzliche Gerätschaften benötigt. Einfach und platzsparend ist der Einsatz von Sensorschuhen, die eine sitzend durchgeführte Laufbewegung erfassen können (s. Bild 2, rechts).

Eine aufrechte Gehbewegung ermöglichen Rundplattformen bzw. Laufbänder, die sich in Ausführung, den damit verbundenen Merkmalen und nicht zuletzt dem Preis über die Anbieter teils deutlich unterscheiden. Rundplattformen werden mitunter in Kombination mit Spezialschuhen eingesetzt, mit denen man über die Rundplattform rutscht und durch die konkave Form zur Mitte gleitet. Daneben gibt es Ausführungen mit ebener Bodenplatte, in denen einzelne Schritte ausgeführt und von den Bodensensoren erfasst werden können. Eine Alternative sind Laufbänder, die entweder als mono- oder als omnidirektional eingestuft werden. Beide Formen ermöglichen Bewegungen in unterschiedliche Richtungen, entweder über das Laufband (omnidirektional, s. Bild 2, links), durch alternative Techniken wie drehbare Plattformen oder die von der Richtung des Oberkörpers gesteuerte Neuausrichtung der virtuellen Welt, die die Illusion einer Seitwärtsbewegung schafft. Vorhandensein und Beschaffenheit der Sicherungstechnik beeinflussen die Sicherheit der Nutzung sowie die Erlebnisqualität. Neben starren Stützringen gibt es Gurtsysteme, die den Nutzern größere Bewegungsfreiheit lassen. Die größeren Laufbänder verzichten auf derartige körpergebundene Sicherungen und bieten stattdessen Außenbegrenzungen. Ein Stürzen der Nutzer wird – im Gegensatz zu den körpergebundenen Sicherungssystemen – damit allerdings nicht gänzlich

ausgeschlossen, ebensowenig wie Verletzungen durch Aufschlagen an den Außenbegrenzungen. Ferner ist anzumerken, dass insbesondere die großen omnidirektionalen Laufbänder sehr teuer sind.

Eine weitere bewegungsbasierte Methode ist das Redirected Walking, das die freie Fortbewegung auf den eigenen Beinen im Raum ohne unterstützende Gerätschaften ermöglicht. Durch Manipulationen der visuellen Darstellungen wird die virtuelle erfahrbare Welt größer als der physisch vorhandene Raum. Möglich wird dies durch Manipulationen der virtuellen Gehgeschwindigkeit (schneller) oder durch die Manipulation der Trajektorien der Nutzer, die diese von der Begrenzung des physischen Raums wegführt. Dies geschieht entweder durch eine verstärkte bzw. abgeschwächte Übertragung der Kopffrotation des Nutzers oder durch graduelle Diskrepanzen zwischen der real und virtuell zurückgelegten Strecke. Somit kann eine unbegrenzte virtuelle Welt in einen begrenzten realen Raum überführt werden. Fallen die Manipulationen allerdings zu stark aus, nimmt das Erleben von Präsenz ab und Cybersickness zu (SUMA et al., 2012; RIETZLER et al., 2018). Für eine unbegrenzte Navigation entlang einer geraden virtuellen Straße muss der reale Raum daher hinreichend groß beschaffen sein und einen begehbaren Kreis mit einem Gehradius von 22 m bieten (STEINICKE et al., 2009), wenn die Manipulation der Trajektorie unbemerkt bleiben soll. Ein ähnliches, aber simplerer Vorgehen bietet das Verfahren der Reorientierung. Hierbei müssen sich die Benutzer bei Erreichen der physischen Grenzen ihres Bewegungsraumes um 180 Grad drehen. Dreht sich die virtuelle Welt um 360 Grad, kann er in der virtuellen Welt weiter geradeaus laufen. Dies bedeutet jedoch, dass eine eigentlich kontinuierliche Fortbewegung systemseitig unterbrochen wird. Folglich fällt die Präsenz geringer aus als bei der Technik des Redirected Walking (SUMA et al., 2012).

Die raumbasierte Fortbewegung stellt einen Spezialfall der bewegungsbasierten Fortbewegung dar. Dabei bewegt sich der Nutzer frei innerhalb eines Raumes, ohne dass die Gehbewegung technisch vermittelt oder durch Modifikationen in der Visualisierung (wie bei Techniken des Redirected Walking) beeinflusst wird. Im Unterschied zu allen anderen Techniken ist die Größe der virtuellen Welt damit auf die verfügbare Fläche des realen Raums begrenzt. Der Nachteil dieser Fortbewegungstechnik ist die Begrenzung der virtuellen Welt auf die Größe des physischen, vom VR-System überwachten Raums, was entweder viel Platz erfordert oder eine starke Begrenzung der virtuellen Welt. Großer Vorteil ist die Natürlichkeit der Fortbewegung und die damit verbundene Reduzierung der Cybersickness (vgl. Kapitel 2.5).

3.2 Zusammenfassung des Einflusses technischer Umsetzungen auf die Erlebnisqualität

Die zahlreichen Technologien und Gerätschaften zur Umsetzung eines VR-Systems weisen teils erhebliche Unterschiede in ihrem Eigenschaftsprofil auf, was wiederum die Qualität der virtuellen Erfahrung beeinflusst. Da die Wahrnehmung der Welt – real wie virtuell – primär visuell erfolgt, misst man den Aspekten, welche die visuelle Erlebnisqualität prägen, eine besondere Bedeutung bei. Auch in diesem Aspekt unterscheiden sich die Modelle der bekanntesten Hersteller mitunter deutlich. Kabelgebundene VR-Brillen setzen unterschiedliche Schwerpunkte in den Aspekten der visuellen Erlebnisqualität – mit einem höheren FOV für eine größere und realitätsnähere Sichtperipherie, einer höheren Auflösung für detailgetreue Abbildungen oder einer flüssigen Bildwiedergabe auch bei schnellen Eigenbewegungen. Eine gleichzeitige Maximierung all dieser Facetten des visuellen Erlebens wird bislang von keinem Modell realisiert. VR-Brillen, die Visualisierung und Tracking autark, d. h. ohne externes Zubehör, realisieren können, müssen im Vergleich zu kabelgebundenen Modellen aufgrund der geringeren Leistungsfähigkeit der in die VR-Brille integrierten Hardware stärkere Abstriche in der visuellen Erlebnisqualität hinnehmen.

Trotz der Dominanz des Sehsinns gilt die Vielfalt der angesprochenen Sinnesmodalitäten und die Tiefe ihrer Erfahrung als der Immersion durchaus zuträglich (Kapitel 2.1). Anreichern lässt sich diese

durch akustischen Raumklang, der eine Verortung der Schallquelle in der virtuellen Welt ermöglicht. Die Art und Verfügbarkeit von Lautsprechern erscheint jedoch angesichts der Tatsache, dass sie auch demontiert bzw. nachgerüstet werden können, nicht als entscheidungsleitendes Merkmal für oder gegen eine VR-Brille. Verstärkt wird die Immersion noch durch die Möglichkeit zur Interaktion mit der virtuellen Welt (Kapitel 2.1). Dazu gehört neben der Fortbewegung durch die virtuelle Welt je nach Anwendungsfall auch die Interaktion mit bzw. Manipulation von virtuellen Objekten. Dies erfordert gegebenenfalls die Ergänzung des VR-Systems um Zusatzfunktionen bzw. -gerätschaften zum Eye-Tracking (bspw. zur blickgesteuerten Interaktion), Handtracking oder Körpertracking (bspw. zur Kommunikation oder Gestensteuerung). Die wirklichkeitsgetreue Interaktion mit virtuellen Objekten und deren Anfassbarkeit kann durch haptische Rückmeldungen mittels Controllern oder Datenhandschuhen zusätzlich unterstützt werden.

Neben den Merkmalen, die Erlebnisvielfalt und -güte verstärken, gibt es jedoch auch erlebnisbeeinträchtigende Faktoren, wie beispielsweise eine fehlende Anpassung an den individuellen lateralen Augenabstand mit Augenermüdung und Kopfschmerzen als Folge (Kapitel 3.1.1), oder ein hohes Gewicht der VR-Brille. Beides sind komfortbezogene Aspekte, die jedoch mitbestimmen, welche Versuchsdauer zumutbar und damit realisierbar ist. Aus genau diesem Grund muss auch dem Auftreten von Cybersickness, das von bestimmten Eigenschaften des VR-Systems mit beeinflusst wird, weitmöglichst begegnet werden. Als kritisch gelten diesbezüglich ein hohes FOV ohne natürliche Fortbewegung sowie das Auftreten von Latenzen, d. h. Verzögerung, mit denen Bewegungen der Nutzer erfasst und in das zugehörige Bild der virtuellen Welt übersetzt werden. Bei einer hohen Latenz werden die sichtbaren Folgen der eigenen Handlungen in der virtuellen Welt zunehmend von selbigen entkoppelt, so dass die Immersion leidet und die Wahrscheinlichkeit von Cybersickness steigt (vgl. Kapitel 2.1 und 2.5). Das Ausmaß der Echtzeitnähe wird maßgeblich von der verwendeten Sensorik, der Leistungsfähigkeit des Rechners sowie der Beschaffenheit der virtuellen Welt (bspw. Detailreichtum, Größe) beeinflusst.

Das Tracking der Position der VR-Brille ist die Voraussetzung dafür, die Eigenbewegung der Nutzer von der realen Welt in die virtuelle Welt zu übertragen. Bei autarken Systemen wird diese Positions-

erfassung durch Kameras in der VR-Brille realisiert, während andere VR-Brillen zur Positionserfassung auf externe optische Trackingsysteme zurückgreifen. Darüber hinaus können je nach Anwendungsfall für das Hand- und Körpertracking verschiedene Technologien und Systeme eingesetzt werden, die sich in der räumlichen und zeitlichen Genauigkeit des Trackings unterscheiden. Am verbreitetsten sind inertialbasierte und optische Verfahren, die eine hohe Echtzeitnähe (inertialbasiertes) oder eine konstant hohe räumliche Übereinstimmung zwischen der Position und Orientierung des Nutzers mit deren Verortung in der virtuellen Welt ermöglichen (optisches Tracking). Beides zusammen ermöglicht eine hohe Datengüte und eine akkurate virtuelle Umsetzung der Eigenbewegung in der virtuellen Welt. Je nach System und gewünschtem Detaillierungsgrad können zusätzliche Sensoren oder Markierungen am Körper bzw. im Raum angebracht werden. Die konsumentenbezogene Anwendung ist dabei originär auf eine übliche Raumgröße ausgelegt, kann jedoch – gegebenenfalls unter Einbindung zusätzlicher externer Systeme – auch auf deutlich größere Räume ausgeweitet werden. In Abhängigkeit von der verwendeten Technologie können spezifische Störfaktoren das Tracking beeinträchtigen (bspw. direkte Sonneneinstrahlung bei optischem Tracking). Derartige Störeinflüsse sollten daher weitmöglichst ausgeschaltet werden.

Die zahlreichen Möglichkeiten zur Fortbewegung als Fußgänger in der virtuellen Welt unterscheiden sich insbesondere in ihrer Nähe zur natürlichen Fortbewegung. Eine hohe Entsprechung zum normalen Gehen verringert zum einen das Auftreten eines sensorischen Konflikts (und damit Cybersickness, s. Kapitel 2.5) und ermöglicht zum anderen, Daten zum Gehverhalten abzuleiten. Um den virtuellen Raum nicht auf die Größe des real verfügbaren und vom VR-System überwachten Raums begrenzen zu müssen, werden Techniken mit mehr oder minder starken Abweichungen zum normalen Gehen eingesetzt, die potenzielle Gefährdungen durch den bewegten Untergrund durch teils rigide, bewegungseinschränkende Sicherungsmechanismen auffangen (bspw. Rundplattformen, Laufbänder) oder artifiziell sind und damit gegebenenfalls erst erlernt werden müssen (bspw. controllerbasierte Fortbewegung mittels Touchpad oder Joystick), zumindest von Anwendern ohne Affinität zu PC- oder Konsolenspielen.

4 Exkurs: Bisheriger Einsatz von VR-Brillen in Fußgänger- und Fahrsimulatoren

Die derzeit verfügbaren VR-Komponenten wurden hauptsächlich zu Unterhaltungs- und nicht zu Forschungszwecken entwickelt. Ihre Nutzbarmachung als Forschungsinstrument ist, wie einleitend beschrieben, vor allem deswegen attraktiv, weil sie eine realistischere und möglicherweise auch versuchsökonomischere Alternative zu bisherigen bildschirm- oder projektionsbasierten Simulatoren beziehungsweise zu aufwändigen Realversuchen bieten. Daher soll die im vorherigen Kapitel dargestellte Vielfalt an VR-Komponenten durch eine kurze Übersicht über den bisherigen Einsatz von VR-Systemen zur Untersuchung von Pkw- und Fußgängerverhalten ergänzt werden. Ziel ist zum einen, einen allgemeinen Überblick über die bislang mit VR-Systemen untersuchten Anwendungsfälle in der verkehrsbezogenen Forschung zu geben. Zum anderen sollen die jeweiligen technischen Umsetzungen dargestellt und die dafür ausschlaggebenden Gründe sowie die berichteten Erfahrungswerte zusammengetragen werden, um konkrete Anforderungen an die technische Umsetzung eines VR-Systems und praktische Empfehlungen zu dessen Anwendung in Probandenstudien ableiten zu können. Handlungsleitende Erfahrungswerte sind hierbei primär bei den Studien zu Fußgängerverhalten als vergleichbarem Anwendungsfall zu erwarten.

4.1 Vorgehen

Zur Übersicht über die bislang für Verhaltensstudien eingesetzten VR-Systeme wurde eine Recherche VR-basierter Fußgänger- und Pkw-Studien in wissenschaftlichen Datenbanken (Sciencedirect, Researchgate) durchgeführt. Die Suchergebnisse wurden gesichtet und bei Aufnahme in die Übersicht nach vorab festgelegten Merkmalen kategorisiert. Die Ergebnisse der Übersicht sind in Kapitel 4.2 beschrieben und in Tabelle 2 und Tabelle 3 veranschaulicht. Anschließend wurden die in den Publikationen berichteten Erfahrungswerte mit konkretem Bezug zum darin verwendeten VR-System zusammengetragen und in Kapitel 4.3 erörtert.

Für die Aufnahme der Studien in die Übersicht wurden folgende Kriterien festgelegt:

- In der Studie wurde das Verhalten von Fußgängern oder Pkw-Fahrern unter Verwendung einer VR-Brille untersucht.
- Die Studie beschränkt sich nicht auf eine reine Exposition von virtuellen Inhalten (bspw. auf Exit Choice bei FENG et al., 2021 oder einen statischen wahrnehmungspsychologischen Vergleich von VR-Brille und CAVE bei GHINEA et al., 2018), sondern erfordert ein der jeweiligen Situation angemessenes Verhalten².
- Die Publikation der Studie liegt maximal fünf Jahre zurück. Angesichts der raschen Weiterentwicklung von VR-Komponenten lassen sich aus älteren Publikationen, die zwangsläufig auf noch älteren technischen Umsetzungen beruhen, mutmaßlich wenige nutzbringende Erfahrungswerte ableiten.

Unterschiedliche Publikationen derselben Forschergruppe oder Forschungsinstitution (hier die TU München) wurden nicht aus der Auswahl ausgeschlossen, da sie aus unterschiedlichen Jahren stammen und die Fortführung bzw. Abweichung von früheren Lösungen Aufschluss über etwaige erforderliche Anpassungen der technischen Umsetzungen aufzuzeigen vermag. Die finale Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern zeigt einen Querschnitt über die verkehrsbezogene Forschung unter Einsatz von VR-Brillen der vergangenen Jahre.

Insgesamt wurden 21 Studien, davon 12 Fußgänger- und neun Pkw-Studien, eingebunden. Die Übersicht über alle 21 Studien unabhängig von der Art der Verkehrsteilnahme beinhaltet folgende Merkmale:

- Ziel der Studie: benennt die übergeordnete Forschungsfrage der Studie
- VR-Brille: nennt Hersteller und Modell der verwendeten VR-Brille einschließlich der in der Publikation genannten technischen Spezifikationen
- Eye-Tracking: kennzeichnet den Einsatz eines integrierten oder zusätzlichen Systems zur Ableitung von Indikatoren des Blickverhaltens, und benennt das verwendete System
- Audio: beschreibt, ob Lautsprecher oder Kopfhörer zusätzlich bzw. anstelle der in der VR-Bril-

le integrierten Kopfhörer verwendet wurden, und benennt selbige

- Tracking: bezeichnet die zum Kopf- und ggf. zum Körpertracking verwendeten Gerätschaften gemäß den in der Publikation verfügbaren Angaben
- Selbstrepräsentation: benennt die zur virtuellen Verkörperung der Probanden in der VR-Welt genutzten Gerätschaften, um deren Bewegungen zu erfassen (in Fußgängerstudien) bzw. die Techniken zur Repräsentation ihrer Arme und Hände (in Fahrsimulatorstudien)
- Software: benennt die Software zur Umsetzung der virtuellen Welt (ergänzt, sofern berichtet, um Angaben zur Software, die zur Einbindung der Hardware oder der virtuellen Verkörperung verwendet wurde)

Darüber hinaus wurde bei Fußgänger- und Pkw-Szenarien die Art der Umsetzung der Fortbewegung in der virtuellen Welt beschrieben:

- Fortbewegung und verfügbare Fläche (Fußgängerszenarien): kennzeichnet die Art der Fortbewegung in der virtuellen Welt sowie die Fläche, die zur Bewegung in der realen (und damit virtuellen) Welt zur Verfügung stand
- Simulatortyp und Eingabegeräte (Pkw-Szenarien): Unterschieden wurde zwischen einem statischen Fahrsimulator und dem Einsatz einer Bewegungsplattform zur Wiedergabe der simulierten Fahrzeugbewegungen. Zudem wurden die verwendeten Eingabegeräte (Lenkrad, Pedalerie) benannt

Leerzellen in der Tabelle bedeuten, dass die Autoren der Studie diesbezüglich keine Angaben machten. Bei Zusatzkomponenten bzw. -funktionen eines VR-Systems (Eye-Tracking, Audio, Selbstrepräsentation) ist anzunehmen, dass diese nicht vorhanden waren, wenn sie nicht berichtet wurden. Bei fehlenden Angaben zum Tracking hingegen ist davon auszugehen, dass das der jeweiligen VR-Brille zugehörige Trackingsystem verwendet wurde. Die Ergebnisse der Übersicht sind in Tabelle 2 (Fußgänger) und Tabelle 3 (Pkw-Fahrer) veranschaulicht und werden nachfolgend erörtert.

² Als Ausnahme mag man eine Studie von YEO et al. (2020) zum automatisierten Fahren betrachten, in dem mangels Übernahmeaufforderungen das Verhalten der Pkw-Fahrer einem reinen Expositionsszenario durchaus ähnelt.

Fußgängerstudien	Ziel	VR-Brille	Eye-Tracking	Audio	Tracking	Selbstrepräsentation	Fortbewegung	Verfügbare Fläche	Software
DORIC et al., 2016	Querungsszenarien: Realismus des VR-Systems	Oculus Rift Development Kit 2			Xsens Motion Capture Platform (basierend auf Inertialsensoren, autark)		Normales Gehen		IPG Car-Maker
FELDSTEIN et al., 2016	Querungsszenarien: Präsenz durch VR-System	Oculus Rift Development Kit 2 Auflösung: 960 × 1080 Diagonales FOV: 100°			Kopftracking mit Inertialsensoren	Körpertracking mit visuellen markerbasiertem Infrarotsystem von Vicon (39 Marker am Körper)	Normales Gehen		Silab (Für Körpertracking: Motion Capture Software von Vicon Nexus)
BÖCKLE et al., 2017	Querungsszenarien: Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen	HTC Vive Gesamtauflösung: 2160×1200 Pixel Bildwiederholfrequenz: 90Hz FOV: 110°		Kopfhörer	Zwei Lighthouse-Stationen, Controller		Normales Gehen	9 x 3 m	
DEB et al., 2017	Querungsszenarien: Verhalten und subjektives Erleben	HTC Vive Bildwiederholfrequenz: 90 Hz			Zwei Lighthouse-Stationen		Normales Gehen	4 x 7 m	Unity 5
MALLARO et al., 2017	Querungsszenarien: HMD vs. Cave	HTC Vive		Stereokopfhörer	Lighthouse-Tracking		Normales Gehen	7 x 3,9 m	Unity 3D
JAYARAMAN et al., 2018	Querungsszenarien: Vertrauen in autonome Fahrzeuge	Virtual Reality Headset					Omnidirektionales Laufband (Virtuix Omni Plattform)		
SCHNEIDER et al., 2018	Genauigkeit der Entfernungsschätzung	HTC Vive Auflösung: 1080 x1200 Pixel je Auge FOV: 110°			Lighthouse-System			5,5 m Diagonale	
SOBHANI & FAROOQ, 2018	Ablenkung durch Smartphone in Querungsszenarien	Oculus Rift			VIRE Gear (Touch-Controller und Sensoren)		Normales Gehen		Unity
HOLLÄNDER et al., 2019	Einfluss externer Fahrzeugdisplays in Querungsszenarien	HTC Vive (erste Generation)		Kopfhörer mit aktiver Geräuschunterdrückung (Bose QC25)	Lighthouse-System		Normales Gehen	3 x 3 m	Unity 2018.2.0f2

Tab. 2: Übersicht über Fußgängerstudien mit VR-Systemen

Fußgängerstudien	Ziel	VR-Brille	Eye-Tracking	Audio	Tracking	Selbstrepräsentation	Fortbewegung	Verfügbare Fläche	Software
CAMARA et al., 2020	Interaktion Fußgänger mit autonomen Fahrzeugen in Querungsszenarien	HTC Vive Pro			Lighthouse-System mit Wireless Adapter zur kabellosen Nutzung		Normales Gehen	6 x 3 m	Unity 3D
FELDSTEIN & DYSZAK, 2020	Querungsszenarien: Reale Welt vs. VR-System	Oculus Rift Development Kit 2		Kopfhörer mit aktiver Geräuschunterdrückung (Bose QC25)		Vicon motion capture system mit Infrarotmarkern an selbstentwickeltem Anzug*	Normales Gehen		Silab
PALA et al., 2021	Querungsszenarien: CAVE vs. VR-Brille	HTC Vive Pro Auflösung: 15 ppp (Pixel je Grad) 1440 x 1600 Pixeln je Auge Horizontales FOV: 110° Vertikales FOV: 100° Bildwiederholfrequenz: 90 Hz			Vier Lighthouse-Stationen	Drei HTC Vive Tracker am Körper (am Gürtel und beiden Füßen) und je ein Controller pro Hand	Normales Gehen	3,8 m x 7,2 m	

* Selbst entwickelter Ganzkörperanzug in Einheitsgröße, der über der Kleidung getragen werden kann. Die darauf befestigten Infrarot LED-Marker ersetzen die weniger effektiven reflektiven Marker des klassischen Vicon-Systems.

Tab. 2: Übersicht über Fußgängerstudien mit VR-Systemen (Fortsetzung)

Pkw-Studien	Ziel	VR-Brille	Eye-Tracking	Audio	Selbstrepräsentation	Simulator-typ	Eingabege-räte	Software
TAHERI et al., 2017	Erprobung des VR-Brillen-setups zur Fahrverhaltensanalyse	HTC Vive				Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Thrust master T150 Lenkrad mit Pedalerie (am/unterm Schreibtisch)	Unity 3D 5.4.0f3
WEIDNER et al., 2017	Vergleich VR-Brille mit Bildschirm (2D und 3D)	Oculus Rift DK2 FOV: 100°		5.2 Audio-system		Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Thrustmaster TX Racing Wheel Leather Edition mitsamt Pedalen Thrustmaster TH8A Schaltung Augmented Reality (AR) S3D Armaturenbrett	Unreal Engine 4

Tab. 3: Übersicht über Pkw-Studien mit VR-Systemen

Pkw-Studien	Ziel	VR-Brille	Eye-Tracking	Audio	Selbstrepräsentation	Simulator-typ	Eingabegeräte	Software
PAI MANGALORE, 2019	Vergleich zweier Fahr-simulatoren: Bildschirm vs. VR-Brille (Fahr- und Blickverhalten)	HTC Vive Business Edition FOV: 110° Auflösung: 1080×1200 Bildwiederhol-frequenz: 90 Hz	Tobii Eye Tracking in HTC Vive integriert (Tobii VR Integration, 2018)		Lenkradbasierte Erfassung (virtuelle Hände am Steuer)	Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Logitech G29 Driving Force Lenkrad mit Pedalerie	Unity 3D SimCreator
RIEGLER et al., 2019	Entwicklung eines low cost – high fidelity Simulators	HTC Vive Pro (einschließlich Kopfhörer)				Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Logitech Lenkrad & Pedalerie (manual driving & TOR) Mikrofon für Sprach-eingaben Erweiterung um Leap Motion Modul für Gestensteuerung	Unity (AutoWDS für Hardware)
SUWARNO et al., 2019	Vergleich zweier Fahr-simulatoren: Bildschirm vs. VR-Brille (Cybersickness)	Oculus Rift				Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Lenkrad Pedalerie	City Car Driving v 1.5.6, Forward Development, Russia
ZÖLLER et al., 2019	Vergleich zweier Fahr-simulatoren: Projektion vs. VR-Brille	HTC Vive FOV: 110° Auflösung: 9,8 Pixel pro Grad je Auge Ergänzt um Weitwinkel-kamera mit Bluescreen (900 g Gesamtgewicht)		2.1 Audio-system	VR Pass-through (Körper und Fahrzeugkarosserie teilweise sichtbar)	Statisch Halbe Fahrzeugkarosserie	Lenkrad Pedalerie	Silab
ARPPE et al., 2020	Vergleich von VR mit vs. ohne Pass-through in Bezug auf Präsenz	Oculus Rift CV1 Auflösung: 1080×1200 je Auge Bildwiederhol-frequenz: 90 Hz Diagonales FOV je Auge: 110° und horizontales FOV: 94° Ergänzt um zwei HD Kameras für stereoskope VR Pass-through			VR Pass-through (Körper teilweise sichtbar)	Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Logitech G920 Lenkrad Pedalerie	Unity und SUMO

Tab. 3: Übersicht über Pkw-Studien mit VR-Systemen (Fortsetzung)

Pkw-Studien	Ziel	VR-Brille	Eye-Tracking	Audio	Selbstrepräsentation	Simulator-typ	Eingabegeräte	Software
YEO et al., 2020	Vergleich von sechs Fahrsimulatoren variierend in visueller und bewegungsbezogener Wiedergabetreue für den Einsatz im Labor (4) und auf der Straße (2)*	Oculus Rift Auflösung: 1080 x 1200 Pixel FOV: 110° Bildwiederholfrequenz: 90 Hz				Bewegungsplattform (A3 Moving Chair von Atomic mit zwei Freiheitsgraden) Keine Fahrzeugkarosserie	Lenkrad und Pedalerie an Bewegungsplattform	Unity
MALONE & BRÜNKEN, 2021	Vergleich zweier Fahrsimulatoren: 3 Monitore mit 22" vs. VR-Brille	Oculus Rift Development Kit 2 Auflösung: 960 x 1,080 Pixel je Auge FOV: 100°		Kopfhörer (für Hinweise an Probanden)		Statisch Keine Fahrzeugkarosserie	Logitech G27 Racing Wheel Lenkrad Pedalerie	3D Datenbank des OpenDS Fahrsimulators
* Beschrieben ist die Implementierung mit VR-Brille (statt Bildschirm) und Bewegungsplattform (statt statisch) für den Laboreinsatz (Variante C)								

Tab. 3: Übersicht über Pkw-Studien mit VR-Systemen (Fortsetzung)

4.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden Ziele und technische Umsetzungen der für Verhaltensstudien mit Fußgängern und Pkw-Fahrern eingesetzten VR-Systeme erläutert. Ziel dieser Zusammenschau ist es, einen generellen Überblick über die gewählten technischen Umsetzungen zu geben.

Ziel:

Bei neun der 21 gesichteten Studien war das Ziel der Untersuchung der Vergleich der VR-Brille mit einer nicht stereoskopischen Visualisierung der virtuellen Welt über Monitore oder Projektionen (acht Studien) bzw. mit der realen Welt (eine Studie) hinsichtlich des damit generierten Verhaltens oder Erlebens der Probanden. Dies lässt sich als Anzeichen dafür interpretieren, dass in Bezug auf die Vor- und Nachteile einer VR-Brille als vergleichsweise neuer Technologie gegenüber konventionellen Ansätzen noch viele Fragen offen sind. Im Bereich der Fahrsimulation sieht man die VR-Brille mitunter als preisgünstige Alternative zur Umsetzung eines Fahrsimulators, bei dem anstelle großer Monitore bzw. Leinwände und eines realistischen Fahrzeugmockups eine VR-Brille nebst Lenkrad und Pedalerie am bzw. unterm Schreibtisch genügt. Bei aufwändigeren Aufbauten ermöglicht der Einsatz einer VR-Brille die deutlich aufwändigere Verschmelzung der virtuellen Simulation mit realen Elementen (hier die Arme der Probanden oder der Fahrzeugkarosserie) mittels VR Pass-Through-Technologie. Dabei bleibt

die reale Welt, die durch mindestens eine an der VR-Brille montierte bzw. in sie integrierte Kamera erfasst wird, durch die VR-Brille wahrnehmbar, während die virtuelle Welt als Hintergrund auf grünflächigen Bereichen (Greenscreen-Technik) visualisiert wird. Bei Fußgängerszenarien ist die fast ausnahmslose Beschränkung auf Querungsszenarien (in 11 von 12 Studien) als Untersuchungsgegenstand augenfällig. Diese werden entweder zur Betrachtung des Querungsverhaltens per se genutzt oder als Setting für andere Fragestellungen wie bspw. Ablenkung oder Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen, die in Querungssituationen untersucht wurden. Die einzige Studie, in der kein Querungsverhalten betrachtet wird, beschäftigt sich mit Grundlagenforschung zur Distanzeinschätzung in virtuellen Welten.

VR-Brille:

Die verwendeten VR-Brillen beschränken sich auf unterschiedliche Modelle der beiden Hersteller Oculus und HTC. Bei den Studien zu Pkw-Fahrern sind beide Hersteller annähernd vergleichbar oft vertreten (fünfmal Oculus und viermal HTC Vive), während bei den Fußgängerstudien die Wahl häufiger auf die HTC Vive fällt (viermal Oculus, siebenmal HTC Vive, einmal ohne Angabe). Die in den Studien berichteten Spezifikationen spiegeln nicht die Gesamtheit der Eigenschaften einer VR-Brille wider, lassen sich jedoch gegebenenfalls als Indikator dafür deuten, welche Merkmale von den

Autoren als bedeutsam angesehen werden. Dazu gehören das FOV, die Auflösung sowie die Bildwiederholfrequenz, wenn auch mitunter ohne konkrete Bezugsgrößen (bspw. Auflösung insgesamt oder je Auge, horizontales oder vertikales FOV). Gründe für die Auswahl der VR-Brille gegenüber alternativen Modellen werden leider nur selten expliziert. DEB et al. (2017) verweisen darauf, dass die von ihnen gewählte HTC Vive das Tracking über einen verhältnismäßig großen Bereich mit dem zugehörigen Basissystem (Lighthouse-Tracking) ohne ein beim damaligen Modell der Oculus Rift zwingend erforderliches Zusatzsystem ermöglicht. Die Beschränkung auf Modelle dieser beiden Hersteller findet sich jedoch nicht im gesamten neueren VR-Forschungsfeld wieder. Exemplarisch sei hier auf zwei Studien verwiesen, die aufgrund der Beschränkung auf die reine Exposition virtueller Inhalte aus der Übersicht ausgeschlossen wurden, und in denen eine smartphonebasierte VR-Brille basierend auf einem iPhone X (FENG et al., 2021) bzw. eine VFX 3D (GHINEA et al., 2018) eingesetzt wurden.

Eye-Tracking:

Nur in einer von den 21 dargestellten Studien wurde ein Eye-Tracking-System eingesetzt. In besagtem Fall erfolgte der Einsatz mit dem Ziel, zusätzlich zum Fahrverhalten auch das Blickverhalten von Pkw-Fahrern bei Verwendung einer VR-Brille im Vergleich zu einer konventionellen bildschirmbasierten Simulation zu untersuchen (PAI MAN-GALORE, 2019). Verwendet wurde dabei das Tobii Eye Tracking System in Verbindung mit der HTC Vive.

Audio:

Sieben von 21 Studien liefern Angaben zur Verwendung eines Audiogeräts. In fünf Studien wurden Kopfhörer verwendet, die entweder nicht näher beschrieben wurden, oder bei denen in der Modellbezeichnung auf die ANC-Funktion („active noise cancelling“) hingewiesen wurde. Aus letzterem lässt sich vermuten, dass die aktive Geräuschunterdrückung der Grund für die Verwendung externer, d. h. nicht in die VR-Brille integrierter Kopfhörer war. In einem Fall diente der Kopfhörer nicht der zusätzlichen Abschottung, sondern der besseren Verständlichkeit der Instruktionen während der Versuchsdurchführung. In den beiden verbleibenden (Fahr-simulator-)Studien wurden Stereolautsprecher (2.1 Audiosystem) bzw. ein 5.1 Audiosystem mit sechs Lautsprechern verwendet.

Tracking und Selbstrepräsentation in Fußgängersimulationen:

Ein Tracking der Probanden war in allen zwölf Studien zwingend erforderlich, um die Bewegung in der virtuellen Welt egozentrisch darstellen zu können. Bei Verwendung der HTC Vive erfolgte dies über das Lighthouse-System, während bei der Oculus-Brille auf externe Komponenten zum Körpertracking (bspw. Xsens Motion Capture, Vicon Motion Capture) oder Controller (Vire Gear) zurückgegriffen wurde. Bei drei der 12 Studien wurden zudem Körperbewegungen der Nutzer in der virtuellen Welt erfasst. Dies erfolgte entweder über Zusatzkomponenten der HTC Vive (insgesamt drei HTC Vive Tracker am Gürtel und beiden Füßen sowie zwei Controller in den Händen), oder aber über das optische VICON-System in Verbindung mit der Oculus Rift. In der älteren Studie wurden die als weniger effektiv beschriebenen reflektiven Marker (39 Stück) verwendet (FELDSTEIN et al., 2016) und später durch infrarotbasierte LED-Marker an einem eigens geschneiderten Anzug ersetzt (FELDSTEIN & DYSZAK, 2020). Eine Individualisierung des Avatars zur Annäherung an das reale Selbst wurde nicht berichtet. Stattdessen wurde derselbe Avatar mit festgelegter Augenhöhe von 180 cm für alle Probanden verwendet, so dass für viele Probanden die Position der Körperglieder nicht optimal wiedergegeben werden konnte (FELDSTEIN & DYSZAK, 2020, PALA et al., 2021).

Fortbewegung und verfügbare Fläche in Fußgängersimulationen:

Bei den Fußgängerszenarien erfolgte die Fortbewegung der Probanden in elf von zwölf Studien durch normales Gehen ohne etwaige technische Hilfsmittel, die eine mehr oder minder abstrakte, vermittelte Fortbewegung ermöglichen. Eine Ausnahme stellt die Studie dar, in denen ein omnidirektionales Laufband (Virtuix Omni Platform) verwendet wurde. In diesem Fall ist die real wie virtuell verfügbare Bewegungsfläche irrelevant, da sie zumindest nicht durch den real verfügbaren Raum begrenzt wird. Bei den Studien, die eine natürliche Fortbewegung ermöglichen, beläuft sich die in der realen Welt verfügbare Fläche (sofern dokumentiert) auf ein Rechteck mit einer Kantenlänge zwischen mindestens drei und maximal neun Metern. Mehr Platz ist zur Modellierung einer zumeist einspurigen Straße in den untersuchten Querungsszenarien auch nicht erforderlich. Für die Studie, die ein mobiles System verwendet hat (Laptop im Rucksack der Probanden), liegt keine Angabe zur genutzten Fläche vor.

Simulatortyp, Eingabegeräte und Selbstrepräsentation in Pkw-Simulationen:

Bei den Fahrsimulatorstudien kommen vorwiegend statische Fahrsimulatoren zum Einsatz. Nur in einer Studie wurde eine Bewegungsplattform verwendet, um die Fahrzeugbewegungen der virtuellen Welt in die reale Welt zurückzuspielen. Dadurch fiel die Cybersickness geringer aus als beim Erleben derselben virtuellen Szenarien ohne kinästhetisches Feedback (YEO et al., 2020). Infolge der Abschottung der Außenwelt durch die VR-Brille erscheint ein Nachbau der physischen Fahrzeugumgebung samt Fahrzeugmockup offenbar nicht erforderlich. Daher begnügt man sich mitunter mit einem an einen Tisch angeschraubten Lenkrad mitsamt Pedalerie. In drei Studien wurden Arme und Hände der Probanden in der virtuellen Welt dargestellt, wobei dies in einem Fall schlicht über die Lenkradposition ohne Erfassung der tatsächlichen Arm- und Handposition erfolgte. In den beiden anderen Studien hingegen wurde die VR-Brille um mindestens eine zusätzliche, an der Brille montierte Kamera erweitert, um Elemente der realen Welt (hier: Fahrzeugkarosserie, Arme und Hände des Probanden) innerhalb der virtuellen Welt darstellen zu können. Im Gegensatz zur Selbstrepräsentation bei den vorab berichteten Fußgängerszenarien handelt es sich hierbei um die eigenen Körperteile der Probanden, und nicht um die virtuellen, mittels Bewegungstracking verorteten Körperabbildungen.

Software:

Vier von 21 Studien (alle Fußgängerszenarien) machen keine Angaben zur Software, die zur Umsetzung der virtuellen Welt verwendet wurde. Ansonsten wurde in mehr als der Hälfte der Studien Unity in unterschiedlichen Versionen genutzt (10 von 17). Silab, die dedizierte Fahrsimulatorsoftware des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften, wurde in drei Studien (davon zwei Studien der TU München) genannt. Bei dem Rest handelt es sich um Einzelnennungen, darunter auch die Unreal Engine 4.

4.3 Ableitung von Erfahrungswerten für die Untersuchung von Fußgängerverhalten mit VR-Systemen

Im Anschluss an den Überblick über die gewählten technischen Umsetzungen im vorherigen Kapitel sollten nachfolgend die ausschlaggebenden Grün-

de für die gewählte technische Umsetzung aufgezeigt und konkrete Erfahrungen mit der Anwendung des Systems zusammengetragen werden, um sie für den Aufbau eines eigenen VR-Systems nutzen zu können. In Bezug auf die Gründe für bzw. Erfahrungen mit der technischen Umsetzung erweisen sich diese Studien jedoch als wenig ergiebig. Sie liefern zwar im Großen und Ganzen die zwingend erforderlichen Angaben, um den technischen Aufbau nachvollziehen zu können. So ergibt sich aus der Wahl der VR-Brille für Fachkundige auch das verwendete Trackingsystem, wenn auch nicht zwangsläufig dessen genaue Ausgestaltung (bspw. das oft nicht genannte kamerabasierte Outside-In-Tracking der Oculus Rift oder die Anzahl der verwendeten Lighthouse-Stationen zum Positionstracking bei der HTC Vive). Was die Studien jedoch weitgehend missen lassen, sind Erfahrungswerte, die einen beim Aufbau eines eigenen VR-Systems leiten können – weniger in Bezug auf die Nennung konkreter Modelle, als vielmehr auch auf Erfahrungswerte, die auf neuere Modelle generalisierbar wären.

Dies liegt nicht nur an der großen Ähnlichkeit der technischen Umsetzungen der Fußgänger-VR-Systeme in den Studien, die lediglich ein Agieren auf kleinem Raum und damit kaum mehr als das Überqueren einer ein- bis maximal zweistreifigen Straße ermöglichen. Bis auf eine Ausnahme (Rundplattform) erfolgte die Fortbewegung mittels normalen Gehens, also ohne Einsatz vermittelter Fortbewegungstechniken. Die überwiegende Entscheidung für eine natürliche Fortbewegung wurde in den gesichteten Studien nicht begründet und lässt sich daher nicht ohne Weiteres auf plausible inhaltliche Überlegungen (wie bspw. die im Vergleich zu vermittelten Fortbewegungstechniken mutmaßlich höhere Validität) zurückführen. Angesichts des in den untersuchten Anwendungsfällen geringen Platzbedarfs von nur wenigen Metern – gerade wenn anstelle einer Querung lediglich die Querungsabsicht angezeigt bzw. durch einen Schritt zurück negiert (FELDSTEIN & DYSZAK, 2020) wurde – dürfte eine Untersuchung mittels natürlicher Fortbewegung wohl die pragmatischere Lösung gegenüber der Beschaffung und Einbindung einer vermittelten Fortbewegungstechnik sein. Die verwendeten VR-Brillen beschränken sich auf kabelgebundene³ Modelle zweier Hersteller, jedoch meist ohne Nennung der ausschlaggebenden Gründe für die jeweils getroffene Entscheidung. Nur DEB et al. (2017) heben

³ Autarke VR-Brillen erst seit 2019 verfügbar

als Vorteil der HTC Vive gegenüber der Oculus Rift hervor, dass erstere das Tracking binnen des zugehörigen Basissystems (Lighthouse-Tracking) ermöglicht.

Aus dem Einsatz des Körpertrackings in Fußgängerstudien wird die Erfahrung mitgegeben, dass die ursprünglich eingesetzten reflektiven Marker wenig effektiv seien (FELDSTEIN et al., 2016) und daher in einer späteren Validierungsstudie durch infrarotbasierte LED-Marker an einem eigens geschneiderten Anzug ersetzt wurden (FELDSTEIN & DYSZAK, 2020). In eben dieser Validierungsstudie wurde ein Ausschnitt der realen Welt in die virtuelle Welt übertragen, um beides anhand eines Querungsszenarios miteinander vergleichen zu können (EBD.). Dabei zeigte sich, dass die Einschätzung der zur Querung noch hinreichenden Zeitlücke im virtuellen Szenario geringer ausfiel als im realen, da Probanden wohl die Geschwindigkeit der nahenden Fahrzeuge nicht hinreichend berücksichtigten. Als mögliche Erklärung wurde die geringe Auflösung diskutiert, welche die Einschätzung der Geschwindigkeit der aus der Ferne herannahenden Fahrzeuge beeinträchtigt haben könnte. Demzufolge wäre eine hohe Auflösung eine wichtige Anforderung an eine zukünftige technische Umsetzung eines VR-Systems.

Über die genannten Beispiele hinaus werden keine Erfahrungswerte mit dem System berichtet, die Stärken oder Schwächen der gewählten technischen Umsetzung erahnen lassen. Auch aus den Pkw-Studien, die aufgrund der per se vermittelten Fortbewegung weniger Anforderungen an den von einem VR-System überwachten Raum stellen, lassen sich keine handlungsleitenden Erfahrungswerte ableiten. Davon abgesehen werden jedoch Empfehlungen zur Studiendurchführung, zur Erweiterung des Systems und zur Einordnung seiner Einsatzfähigkeit ausgesprochen. Demzufolge ist eine Trainingsphase unerlässlich, um sich mit der Bewegung durch die virtuelle Welt vertraut zu machen und anfängliche Probleme mit Desorientierung und Balance zu beheben (DORIC et al., 2016). Zudem empfinden Probanden die Visualisierung der Grenzen der Bewegungsfläche bei der HTC Vive durch ein in der virtuellen Welt eingeblendetes Gitter als nicht sicher genug. Daher sollte auf einen hinreichenden Abstand zwischen der begehbaren Fläche und den physischen Raumgrenzen geachtet wer-

den – oder andere Sicherheitsmechanismen in Betracht gezogen werden⁴ (PALA et al., 2021). Zudem wird empfohlen, die virtuelle Erfahrung um verschiedene Aspekte anzureichern. Dazu gehören die Einbindung räumlicher akustischer Hinweisreize (DORIC et al., 2016; SCHNEIDER et al., 2018) oder die virtuelle Selbstrepräsentation der Probanden für ein realistischeres Risikoempfinden und eine bessere Einschätzung von Entfernungen (MALLARO et al., 2017; SCHNEIDER et al., 2018). Beides wurde in anderen, hier aufgeführten Studien bereits umgesetzt (s. Tabelle 2). Darüber hinaus wird eine detailgetreuere Grafik gerade angesichts der geringeren Geschwindigkeiten von Fußgängern im Vergleich zu motorisierten Verkehrsteilnehmern empfohlen sowie die Möglichkeit zur direkten Interaktion mit der Umgebung (FELDSTEIN et al., 2016).

Aus den Studien geht hervor, dass die von Probanden berichtete Realitätsnähe bzw. Präsenz bei Nutzung der VR-Brillen zufriedenstellend ausfällt und Cybersickness selten auftritt (DEB et al., 2017; DORIC et al., 2016; FELDSTEIN et al., 2016; PALA et al., 2021), und zwar auch bei Probanden im Alter von etwa 70 Jahren (PALA et al., 2021). Die oft in virtuellen Welten berichtete Unterschätzung von Entfernungen trat bei größeren Entfernungen ab acht Metern nicht auf und nahm somit keinen Einfluss auf die Querungsentscheidungen (EBD.). All dies lässt auf eine prinzipiell gegebene Einsatzfähigkeit der verwendeten VR-Systeme schließen. Dahingegen wird nicht deutlich, welche inhaltlichen oder pragmatischen Überlegungen (bspw. die Verfügbarkeit eines vor Jahren eingerichteten VR-Labors) für die technische Umsetzung maßgeblich waren. Damit lassen sich keine Leitlinien zur Gestaltung eines VR-Systems ableiten, welche in die im nachfolgenden Kapitel vorgestellte Definition von Anforderungen an ein VR-System (zusammengefasst in Kapitel 5.3) einfließen können.

Keine der in Tabelle 2 aufgeführten Fußgängerstudien widmete sich einer Fragestellung, die eine weitläufigere Exploration virtueller Welten verlangte, wie sie viele Forschungsthemen im Bereich der Sicherheits- und Mobilitätsforschung voraussetzen (s. Kapitel 6.4). Die Probanden mussten jeweils nur wenige Meter, meist zum Überqueren einer Straße, zurücklegen. Da in den Untersuchungen fast ausschließlich auf die natürliche Fortbewegung zurückgegriffen wurde, lassen sich keine Aussagen

⁴ Die Sicherungstechniken unterscheiden sich zwischen VR-Brillen. VR-Brillen mit integrierten Kameras können bei Verlassen des vorab definierten Bereichs die reale Welt mittels der integrierten Kameras darstellen (Pass-through-Modus, der auch bei den Fahrstudien zur Darstellung der Arme der Probanden und der Karosserie eingesetzt wurde).

darüber treffen, ob die natürliche Fortbewegung die Methode der Wahl zur Untersuchung von Fußgängerverhalten ist, oder ob auch bestimmte vermittelte Fortbewegungstechniken eine valide Alternative bieten können. Bei den berücksichtigten Studien zeigten sich im Großen und Ganzen ähnliche Ansätze mit kabelgebundenen VR-Brillen zweier Hersteller und natürlicher Fortbewegung auf begrenztem Raum. Die Begrenzung des virtuellen Szenarios auf einen Raum von nur wenigen Metern erleichterte es, eine natürliche Fortbewegung im realen Raum mit einem reliablen Tracking zu verbinden. Dabei ermöglichen die aktuell verfügbaren technischen Mittel prinzipiell heterogenere Anwendungsszenarien als die hier beschriebenen. Dies erfordert jedoch die Einbindung anderer bzw. zusätzlicher VR-Komponenten sowie eine sorgfältige Abwägung der dabei auftretenden Zielkonflikte, beispielsweise wenn eine natürliche Fortbewegung in einer größeren virtuellen Welt bei gleichzeitig robustem und reliablen Tracking umgesetzt werden soll. Welche technische Umsetzung diese Herausforderungen bestmöglich löst, lässt sich daher auf Basis der vorliegenden Übersicht nicht beantworten. Diese offene Frage wird daher in der in Kapitel 6 beschriebenen Expertenbefragung wieder aufgegriffen.

5 Anforderungen an ein VR-System für Verhaltensstudien

In den Kapiteln 2 und 3 wurde erläutert, welche Eigenschaften VR-Komponenten mitbringen und wie die Erlebnisqualität virtueller Welten von diesen Eigenschaften mitbeeinflusst wird. Übergeordnete Konzepte wie Immersion und Präsenz sind inhaltlich eng verbunden mit der Wiedergabetreue oder Realitätsnähe eines VR-Systems. Diese Realitätsnähe wird wiederum von den Eigenschaften der VR-Brille (FOV, Auflösung, etc.), des Trackings (Genauigkeit der Erfassung, Verfügbarkeit von Körpertracking zur Selbstrepräsentation oder Interaktion, etc.) und der Fortbewegungstechnik (Natürlichkeit, etc.) mitbeeinflusst. Die VR-Komponenten entscheiden aber nicht nur über die Erlebnisqualität, sondern auch über den Aufwand (Platzbedarf der gewählten Fortbewegungstechnik, etc.) und die erforderlichen Rahmenbedingungen (raumbasierte Installationen zum Lighthouse-Tracking vs. mobiler Einsatz autarker VR-Brillen, etc.) zur Umsetzung des VR-Systems.

Was aus diesen literatur- und komponentenbasierten Darstellungen noch nicht hinreichend deutlich hervorgeht, sind die Anforderungen, die gewährleistet sein müssen, um das VR-System für Forschungszwecke einsetzen und valide Verhaltensdaten ableiten zu können. Diese Anforderungen werden nachfolgend erörtert (s. Kapitel 5.1). Anschließend werden die versuchsökonomischen Anforderungen an Aufbau und Nutzung eines VR-Systems dargestellt (s. Kapitel 5.2). Die Gesamtheit der Anforderungen an Erlebnisqualität, Forschungseinsatz und Versuchsökonomie werden anschließend in einem Kriterienkatalog zusammengeführt (s. Kapitel 5.3). Dieser Kriterienkatalog bietet eine vollständige und gleichzeitig handhabbare Übersicht über die Anforderungen, die ein VR-System zur Erforschung von Fußgängerverhalten erfüllen sollte. Damit bildet er die Grundlage für die anforderungsbezogene Umsetzung und Bewertung eines VR-Systems für Fußgängerstudien als Hauptziel des vorliegenden Projekts (s. Kapitel 6).

5.1 Inhaltliche Anforderungen zur Durchführung von Verhaltensstudien

Die Nähe zum realen Erleben als zentrale Voraussetzung für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse wurde bereits im Rahmen der Konzepte der Immersion und Präsenz (Kapitel 2.1) erörtert und wird daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft. Darüber hinaus stellen vor allem die Durchführbarkeit der gewünschten Verhaltensstudien sowie die Möglichkeit zur Ableitung valider Verhaltensdaten wesentliche Anforderungen an ein Forschungsinstrument dar. Eine wichtige Anforderung an das System ist demnach seine breite Einsatzfähigkeit zur Untersuchung verschiedenster Aspekte des sicherheits- und mobilitätsbezogenen Verhaltens von Fußgängern. Dies schließt insbesondere die Eignung für größere virtuelle Welten mit weitläufigerer Exploration als die bislang vorrangig untersuchten Queerungsszenarien ein (s. Kapitel 4). Um eine breite Einsatzfähigkeit zu gewährleisten, muss die finale technische Umsetzung die wichtigsten Anforderungen unterschiedlicher Forschungsthemen zumindest hinreichend erfüllen. Gleichzeitig ist jedoch davon auszugehen, dass sie nicht für jedes Forschungsthema die bestmögliche oder auch nur eine hinreichend geeignete Lösung darstellt.

Da experimentelle Verhaltensstudien von jeher darauf angelegt sind, von einer betrachteten Stichprobe auf die Grundgesamtheit schließen zu können, ist die Möglichkeit zur Einbindung heterogener Probandengruppen zwingend erforderlich. Das VR-System sollte daher für Probanden unabhängig ihres Alters, ihrer Vorerfahrung in VR oder dem Vorliegen etwaiger Einschränkungen auf möglichst ähnliche Weise erlebbar und beherrschbar sein. Sollte es nämlich an bestimmte Personengruppen höhere Anforderungen stellen als an andere, würde die Aussagekraft der Ergebnisse durch derartige Artefakte systematisch verzerrt – bspw. bei der Untersuchung von alterskorrelierten Effekten mittels Verwendung von (z. B. controllerbasierten) Fortbewegungstechniken, mit denen Jüngere als Nutzer von Spielkonsolen eher vertraut sind, während vor allem Ältere diese erst erlernen müssten.

Aus ethischen Gründen ist die weitmöglichste Gewährleistung der körperlichen Unversehrtheit der Probanden bei der Studiendurchführung nicht verhandelbar. Auch wenn diese probandenübergreifend gegeben sein muss, erhöht die Einbindung vulnerabler Probanden die Sicherheitsanforderungen. Daher sollte das VR-System entweder von vornherein auf die Vermeidung von Stürzen ausgelegt sein (bspw. über vermittelten Fortbewegungstechniken oder Sicherungsgurte, s. Kapitel 3.1.4) oder es müssen zusätzliche Sicherungsmaßnahmen einbezogen werden. Gleichzeitig muss jedoch darauf geachtet werden, keine vermeidbaren Abstriche an der Realitätsnähe des VR-Systems und der damit generierten Daten hinzunehmen. Welche Daten in welchem Detaillierungsgrad verfügbar sein müssen, wird mit Blick auf die zur Beantwortung der Fragestellung erforderlichen Messgrößen definiert (Trajektorien, Gehgeschwindigkeit, Zögern und Ausweichen, Blickverhalten, etc.). Die technische Umsetzung des VR-Systems entscheidet über deren Verfügbarkeit (Fortbewegungstechnik, Funktionsumfang des Trackings wie bspw. Eye-/Hand- bzw. Körpertracking, etc.). Die erwünschte Verfügbarkeit der Daten bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Anwender des VR-Systems und nicht auf den Hersteller. So sollte eine Nutzung des VR-Systems im Forschungsalltag möglich sein, ohne dass nutzungsbezogene Informationen von den Herstellern der VR-Komponenten abgegriffen werden.

Die Verhaltensdaten müssen nicht nur verfügbar, sondern auch valide sein, d. h. sie sollen das abbilden, was auch in der realen Welt beobachtbar wäre.

Die Voraussetzung dafür ist zum einen ein möglichst realitätsnahes Erleben und Interagieren (mit der virtuellen Welt (s. Kapitel 2.1), und zum anderen eine verlässliche Erfassung der Daten über die gesamte Laufzeit des Versuchs.

5.2 Versuchsökonomische Anforderungen an ein VR-System zur Durchführung von Experimentalstudien

Auch wenn aus Forschersicht ökonomische Aspekte den vorab erläuterten inhaltlichen Anforderungen unterzuordnen wären, spielen finanzielle und zeitliche Ressourcen im Forschungsalltag eine wichtige Rolle. Unterscheiden lässt sich hierbei zwischen den Anforderungen, die bei Nutzung des VR-Systems an das Versuchsumfeld und an die mit der Versuchsdurchführung betrauten Personen gestellt werden. Wünschenswert ist zum einen eine möglichst einfache und unaufwändige Nutzung, um den Erhebungsaufwand für Probanden und Versuchsleitung gering zu halten. Aufgaben wie bspw. das Anlegen und die Kalibrierung der zugehörigen Komponenten, die erforderliche Eingewöhnungsphase an das VR-System sowie etwaige weitere Erfordernisse (bspw. Akkutausch, Kontrolle und Nachkalibrierung, Abbrüche und Nacherhebungen wegen Cybersickness o. ä.) erhöhen den Erhebungsaufwand. Des Weiteren ermöglicht eine einfache Erlernbarkeit der zur Durchführung erforderlichen Schritte, Personen ohne einschlägige technische Expertise in die Versuchsleitung einbinden zu können. Bei Nutzung eines VR-Systems durch zahlreiche Personen, wie im Forschungskontext angestrebt, sind prinzipiell auch hygienische Aspekte oder die Möglichkeit zum Tragen einer Sehhilfe unter der VR-Brille bedeutsam. Dafür lassen sich jedoch anderweitige Lösungen finden (bspw. Entfernung des Polsters um mehr Platz zu schaffen, Verwendung von Gesichtsmasken), ohne die Wahl der VR-Brille nach diesen Kriterien ausrichten zu müssen.

Ein weitaus gewichtigerer ökonomischer Faktor sind die Anforderungen, die die Nutzung des VR-Systems an das Versuchsumfeld stellt. Soll die Bewegung in der virtuellen Welt nicht auf wenige Schritte begrenzt werden, müssen entweder Abstriche bei der Natürlichkeit der Fortbewegung gemacht werden oder aber hinreichend Platz weit über die normale Raumgröße hinaus bereitgestellt werden. Fraglich ist, inwiefern ein derartiger Raum

verfügbar (und falls ja, finanzierbar) ist. Hilfreich wäre gegebenenfalls die Möglichkeit zur flexiblen Wahl eines Raums passender Größe in Abhängigkeit von den jeweiligen Studienerfordernissen. Diese Flexibilität ist zumindest bei autarken Systemen ohne externe Gerätschaften und deren Erfordernisse (bspw. Kabelführung, Stromversorgung, Montage) gegeben, aber in anderweitiger Hinsicht mit Einschränkungen verbunden (s. Kapitel 3.1.1). Bei der Raumwahl muss zudem sichergestellt sein, dass Versuchserfordernisse wie die Vermeidung von Störfaktoren beim Tracking (bspw. Abschirmung direkter Sonne) und die Beseitigung von Hindernissen zur ungehinderten Bewegung im Raum erfüllt sind. Die Bereitstellung einer derartigen Infrastruktur ist nicht nur mit Aufwand, sondern auch mit Kosten verbunden. Dazu addieren sich die Kosten, die zur Anschaffung der erforderlichen VR-Komponenten einschließlich Zubehör (bspw. leistungsfähiger Rechner/Grafikkarte) und deren Betrieb erforderlich sind. Diese Kosten sind jedoch nicht allein nach ihrer absoluten Höhe zu bewerten, sondern müssen auch ins Verhältnis zum Nutzenprofil der möglichen Alternativen gesetzt werden. Gerade bei kostenintensiven Anschaffungen sollte auch die erwartbare Lebensdauer bzw. das schnelle Voranschreiten der technischen Entwicklung perspektivisch berücksichtigt werden.

5.3 Kriterienkatalog

Die vorab erläuterten Anforderungen an ein zur Verhaltensforschung bei Fußgängern einzusetzendes VR-System werden nachfolgend in einem Kriterienkatalog zusammengefasst, beschrieben und geordnet. Dieser Kriterienkatalog wird die Identifikation des bestmöglich geeigneten VR-Systems leiten und die Grundlage zur Bewertung seiner Vor- und Nachteile im nachfolgenden Kapitel schaffen. Zur Erstellung des Kriterienkatalogs wurden in einem ersten Schritt aus den vorangegangenen Kapiteln 2, 3 und 5 die Kriterien abgeleitet, die unmittelbar die Erlebnisqualität, den Forschungseinsatz oder die Versuchswirtschaftlichkeit beeinflussen. Ergänzt wurde eine kurze Definition zur inhaltlichen Beschreibung. Zur besseren Übersicht wurden inhaltlich verwandte Aspekte zusammengefasst (bspw. FOV und Auflösung zur visuellen Erlebnisqualität). Die insgesamt 19 Kriterien wurden anschließend nach inhaltlicher Nähe heuristisch geordnet und zu sechs Dimensionen zusammengefasst, die wie folgt benannt wurden:

- 1) **Realitätsnähe:** Die Dimension Realitätsnähe beinhaltet jene Kriterien, die Natürlichkeit und Wiedergabetreue des Erlebens und Handelns in der virtuellen Welt beschreiben. Inhaltlich lehnt sie damit vorrangig an die Konzepte der Immersion und Präsenz an.
- 2) **Beeinträchtigungsfreiheit:** Die Dimension Beeinträchtigungsfreiheit beschreibt das Ausbleiben unerwünschter Begleiterscheinungen der Systemnutzung, welche die Erlebnisqualität und damit möglicherweise auch die Aussagekraft der Daten einschränken.
- 3) **Datenverfügbarkeit und -güte:** Die Dimension Datenverfügbarkeit und -güte beschreibt, inwieweit die Trackingdaten sowie die zur Interpretation erforderlichen Verhaltensmaße erfasst werden und aussagekräftige Werte liefern.
- 4) **Verwendbarkeit für unterschiedliche Einsatzzwecke:** Die Dimension Verwendbarkeit für unterschiedliche Einsatzzwecke beinhaltet die erforderlichen Voraussetzungen für den Einsatz eines VR-Systems für eine Vielzahl von Forschungsthemen.
- 5) **(Versuchs-)Ökonomie:** Die Dimension Versuchswirtschaftlichkeit beschreibt den zeitlichen oder finanziellen Aufwand bei der Anschaffung und der Anwendung eines VR-Systems.
- 6) **(Daten-)Sicherheit:** Die Dimension (Daten-)Sicherheit definiert die Privatheit der Daten und die körperliche Unversehrtheit als Anforderungen an ein VR-System.

Die sechs Dimensionen spiegeln zentrale Konzepte wider, die bei VR-Systemen bzw. Forschungsinstrumenten generell bedeutsam sind. Sie sind nicht unabhängig voneinander, da manche Kriterien mehr als einer Dimension zugeordnet werden könnten. Beispielsweise ist die Echtzeitnähe, d. h. eine möglichst geringe Latenz bei der Übersetzung der Aktionen der Nutzer in die Darstellung der virtuellen Welt, nicht nur ein wichtiger Faktor für die Realitätsnähe des VR-Systems, sondern beeinflusst auch maßgeblich das Auftreten von Cybersickness und damit die Beeinträchtigungsfreiheit. Das gleiche gilt für die Natürlichkeit (mit Bezug auf die Fortbewegung) und die Größe des FOV als ein Aspekt der visuellen Erlebnisqualität.

Gleichzeitig ist damit zu rechnen, dass eine gleichzeitige Erfüllung der inhaltlichen und pragmatischen

Kriterien kaum realisierbar ist. Ziel kann daher nicht die Maximierung aller Kriterien, sondern deren weitmögliche Erfüllung mit Blick auf die jeweiligen Erfordernisse der Studie unter sorgfältiger Abwägung etwaiger Widersprüche sein. Eine Übertragbarkeit des Kriterienkatalogs auf andere, nicht zur Verhaltensforschung im Bereich Fußgängersicherheit und -mobilität verwendete VR-Systeme, wäre kritisch zu

prüfen. Möglicherweise verlieren manche Kriterien an Gewicht, während anwendungsspezifisch bedeutsame Aspekte fehlen. Beispielsweise müsste bei der VR-basierten Simulation kollaborativer Tätigkeiten die Einbindung von zwei oder mehr Personen gewährleistet werden. Dahingegen wäre bei einer Beschränkung auf Studien, die VR-Brillen ausschließlich zur Darbietung virtueller Inhalte wie

Kriterien je Dimension		Beschreibung	Verweis
Realitätsnähe	Visuelle Erlebnisqualität	Die Visualisierung der für den Betrachter sichtbaren virtuellen Welt entspricht in Umfang und Güte weitmöglichst der realen Welt. Dies beinhaltet u. a. hohe Detailtreue (Auflösung) und ein großes Sichtfeld (FOV).	Kapitel 2.1 und 3.1.1
	Erlebnismultifalt	Die virtuelle Erfahrung bietet die Erfahrungen und Handlungsmöglichkeiten, die auch in der realen Welt gegeben wären (akustische Raumwahrnehmung, haptisches Feedback, Fortbewegung, Interaktion mit virtuellen Objekten, etc.).	Kapitel 2.1
	Natürlichkeit	Das (Inter-)Agieren in der virtuellen Welt, sei es die Fortbewegung oder die Interaktion mit anderen (virtuellen) Agenten oder Objekten, wird als natürlich, d. h. der realen Welt entsprechend, empfunden.	Kapitel 2.1
	Echtzeitnähe	Die Aktionen der Nutzer werden mit möglichst geringen und vor allem konstanten Verzögerungen (Latenzen) in die virtuelle Welt übersetzt.	Kapitel 2.5 und 3.1.2
Beeinträchtigungsfreiheit	Komfort	Die Nutzung des VR-Systems wird auch bei längerer Versuchsdauer nicht als intrusiv oder unangenehm empfunden.	Kapitel 3.1.1 und 3.1.2
	Vermeidung von Cybersickness	Die technische Umsetzung des VR-Systems wirkt dem Auftreten von Cybersickness entgegen (bspw. durch die Vermeidung sensorischer Konflikte).	Kapitel 2.5
	Bewegungsfreiheit	Es wird eine ungehinderte, nicht durch Sicherungsmechanismen, Kabelgebundenheit o. ä. eingeschränkte Bewegung ermöglicht.	Kapitel 3.1.1 und 3.1.4
(Versuchs-)Ökonomie	Geringer Erhebungsaufwand	Die zur Studiendurchführung erforderlichen Schritte (bspw. Kalibrierung) sind unaufwändig und nach Einweisung auch ohne Vorkenntnisse gut zu bewältigen.	Kapitel 5.2
	Erfüllbarkeit der Anforderungen an das Versuchsumfeld	Die an das Versuchsumfeld gestellten Anforderungen, insbesondere der Raumbedarf und die Vermeidung von Störfaktoren (bspw. Lichtabschottung bei optischem Tracking), sind umsetzbar.	Kapitel 3.1.2 und 5.2
	Mobilität	Das VR-System benötigt keine externen Gerätschaften oder festen Rauminstallationen (bspw. PC, Sensoren) und kann daher mobil, d. h. raumungebunden, eingesetzt werden.	Kapitel 3.1.1 und 3.1.2
	Kosteneffizienz	Die Kosten für Anschaffung und Betrieb des VR-Systems werden auf das zur Erfüllung der zentralen Anforderungen Erforderliche beschränkt.	Kapitel 5.2
Verwendbarkeit für unterschiedliche Einsatzzwecke	Zugänglichkeit für heterogene Probandengruppen	Das VR-System ist für unterschiedliche Nutzergruppen, unabhängig von Alter, VR-Erfahrung, o. ä. gleichermaßen geeignet.	Kapitel 5.1
	Hinreichende Größe der virtuell erlebbaren Welt	Die Größe der erlebbaren virtuellen Welt wird nicht durch das VR-System bzw. das Versuchsumfeld (Raumverfügbarkeit) begrenzt.	Kapitel 3.1.4 und 5.2
	Eignung für unterschiedliche Forschungsfragen	Das VR-System erfüllt die Kernanforderungen vieler verschiedener Forschungsthemen bzw. ist um die ggf. erforderlichen Funktionen (bspw. Eye-Tracking, kabellose Nutzung) erweiterbar.	Kapitel 5.1
Datenverfügbarkeit und -güte	Datenverfügbarkeit	Die zur Beantwortung der Forschungsfragen erforderlichen Daten (bspw. Eye-Tracking, Handtracking, etc.) werden erfasst und gespeichert.	Kapitel 5.1
	Akkuratheit der Daten	Die erfassten Daten sind über die gesamte Versuchsdauer akkurat.	Kapitel 5.1
	Robustheit	Das VR-System ist nicht anfällig für Störfaktoren bzw. Störfaktoren lassen sich einfach und effektiv ausschließen.	Kapitel 5.1
Sicherheit	Gefährdungsfreiheit	Die körperliche Unversehrtheit innerhalb der Versuchsumgebung ist gewährleistet.	Kapitel 5.1
	Privatheit der Daten	Es gehen keine nutzungsbezogenen Informationen an die Hersteller der Systemkomponenten.	Kapitel 5.1

Tab. 4: Übersicht über den Kriterienkatalog

bspw. Videos nutzen, der Aspekt der Bewegungsfreiheit oder der Natürlichkeit der Fortbewegung oder Interaktion irrelevant. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über den Kriterienkatalog.

6 Expertenbefragung

6.1 Zielstellung

Der in Kapitel 5.3 vorgestellte Kriterienkatalog enthält die an ein zur Verhaltensforschung im Bereich Fußgängersicherheit und -mobilität einzusetzendes VR-System gestellten Anforderungen. Noch unbeantwortet ist jedoch die Frage, welche technische Umsetzung die dort genannten Anforderungen bestmöglich erfüllt. Einschlägige Fachpublikationen können diesbezüglich kaum weiterhelfen. Blickt man auf die bislang gewählten technischen Umsetzungen binnen der eigenen Fachdisziplin, so beschränken sich diese auf Szenarien in kleinen virtuellen Welten (s. Kapitel 4). Damit ist das Kriterium der breiten Verwendbarkeit des Systems zur Untersuchung von Fragestellungen, die auch eine weitläufigere Exploration virtueller Welten als nur eine Straßenquerung erfordern, nicht erfüllt. Darüber hinaus sind wissenschaftliche Studien, die in der Regel einen langen Prozess bis zur Publikation durchlaufen, nicht in der Lage, mit den schnellen Entwicklungszyklen von VR-Komponenten mitzuhalten und die aktuell gegebenen technischen Möglichkeiten abzubilden. Daher fehlt es an handlungsleitenden Empfehlungen zum Aufbau eines VR-Systems zur Untersuchung von Fußgängerverhalten in größeren virtuellen Welten. Um diese Wissenslücke zu schließen, sollte eine Expertenbefragung durchgeführt werden, um auf die Expertise von denjenigen zurückzugreifen, die umfassende Erfahrung mit dem Einsatz von VR-Systemen aufweisen.

Ziel der nachfolgend vorgestellten Expertenbefragung war es, konkrete Empfehlungen zur technischen Umsetzung des für Fußgängerverhaltensstudien bestmöglich geeigneten VR-Systems abzuleiten. Das VR-System sollte auf die späteren Anwendungsfälle zugeschnitten sein und die wichtigsten Kriterien weitmöglichst erfüllen. Ergänzend sollten Erfahrungen und Ratschläge in Bezug auf ausgewählte Themenbereiche zusammengeführt werden. Die Auswahl wurde aus Zeitgründen auf drei Themenbereiche begrenzt und erfolgte mit Blick auf die Relevanz des Themenbereichs. Dazu

gehörten zum einen Möglichkeiten und Grenzen beim Einsatz von Eye-Tracking mittels VR-Brille. Eye-Tracking ermöglicht die Erfassung der visuellen Aufmerksamkeitszuwendung, die bei unterschiedlichen Forschungsthemen von Interesse ist (s. Übersicht über Forschungsthemen zu Fußgängerverhalten in Tabelle 11 auf Seite 64). Des Weiteren wurden technische Möglichkeiten zur Einbindung eines Smartphones in die virtuelle Welt eruiert. Die smartphoneinduzierte Ablenkung durch Texten, Surfen oder Spielen im Straßenverkehr gilt als eine bedeutsame Gefährdung der Verkehrssicherheit auch bei Fußgängern (s. NASAR et al., 2008; TAPIRO et al., 2016). Zuletzt wurde nach Erfahrungen mit der Einbindung älterer, auch mobilitätseingeschränkter Verkehrsteilnehmer in die VR-Umgebung gefragt. Der größte Anteil an Getöteten im Straßenverkehr entfällt auf Verkehrsteilnehmer ab 65 Jahren, (DESTATIS, 2021), weswegen dieser Gruppe in der Verkehrssicherheitsforschung eine besondere Bedeutung zukommt. Ein Forschungsinstrument – insbesondere eines, dessen Komponenten originär für jüngere und technikaffine Gruppen entwickelt wurden – sollte daher auch diese Risikogruppe bestmöglich einbinden können.

6.2 Vorgehen

In mündlichen Interviews mit Experten wurden die folgenden drei Themenbereiche adressiert:

- 1) Beschreibung und Bewertung des bzw. der bestmöglich geeigneten VR-Systems/VR-Systeme zur Untersuchung von Fußgängerverhalten (Schwerpunkt der Interviews)
- 2) Erfahrungen und Ratschläge mit/zu den vorab genannten Vertiefungsthemen
- 3) Ausblick auf zukünftige technische Entwicklungen

Die Beschreibung und Bewertung des bestmöglich geeigneten VR-Systems sollte mit Blick auf spätere Anwendungsfälle erfolgen. Daher wurden exemplarisch zwei Szenarien abgeleitet, welche die Aufgabe der Probanden in der virtuellen Welt und die interessierenden Verhaltensmaße kurz beschreiben (Kapitel 6.2.1). Anschließend wurden die Experteninterviews gemäß dem in Kapitel 6.2.2 dargelegten Vorgehen durchgeführt.

6.2.1 Ausgewählte Szenarien

Die Auswahl beider Szenarien folgte der Überlegung, die Größe der zu begehenden virtuellen Welt zu variieren, um eine Entscheidung über die jeweils bestmögliche Art der Fortbewegung durch virtuelle Welten unterschiedlicher Größe zu forcieren. Ein Szenario, das eine Bewegung von nur wenigen Metern erfordert, wurde dabei nicht berücksichtigt, da der erwartbare Erkenntnisgewinn angesichts des großen Konsens bei der technischen Umsetzung (s. Kapitel 4) gering erschien. Des Weiteren wurde entschieden, nur jeweils einen Probanden zur selben Zeit als Fußgänger in das Szenario einzubinden. Auf Basis dieser Festlegungen wurden ein Querungsszenario mit freier Wahl der Querungsstelle sowie ein Routenwahlszenario ausgewählt.

Szenario 1: Querung entlang einer Strecke

Der Proband geht eine Straße entlang. Er bekommt die Anweisung, sich zügig zu einem Zielpunkt auf der gegenüberliegenden Seite zu begeben. Dieser liegt etwa 50 m entfernt. Dazu muss er die Straße bei einer passenden Gelegenheit überqueren, sich auch beim Weitergehen gelegentlich umschaun und Fahrzeuge bzw. andere Verkehrsteilnehmer auf dem Geh- oder Radweg passieren lassen. Folgende Informationen müssen verlässlich erfasst werden:

- Schauen nach links und rechts
- Bewegungspfade, d. h. Trajektorien
- Beschleunigen/verlangsamen
- Gehgeschwindigkeit

Bei der Fortbewegung durch die virtuelle Verkehrswelt begegnen dem Probanden andere KI-basierte Agenten, denen er auch ausweichen soll. Wie lässt es sich technisch realisieren, dass:

- sich die Ausweichbewegung (Schritt zur Seite) in den Daten widerspiegelt, und...
- ... sein Avatar diese Ausweichbewegung abbildet?

Szenario 2: Routenwahl

Die Probandin bewegt sich durch eine Innenstadt zu verschiedenen, vorgegebenen Zielpunkten. Sie trifft Entscheidungen zwischen verschiedenen Routenoptionen und folgt der jeweils gewählten Option. Insgesamt legt sie eine längere Strecke von mehr als einem Kilometer in der virtuellen Welt zurück.

Folgende Informationen müssen verlässlich erfasst werden:

- Bewegungspfade, d. h. Trajektorien
- Gehgeschwindigkeit

Folgende, an den Kriterienkatalog angelehnte, Anforderungen wurden den Experten als für beide Szenarien bedeutsam genannt:

- Zugänglichkeit des VR-Systems: Möglichkeit zur Einbindung unterschiedlicher Nutzergruppen (junge Erwachsene und Ältere, Personen mit und ohne VR-Erfahrung)
- Datenverfügbarkeit und -güte: Verfügbarkeit robuster, möglichst fehlerfreier Verhaltensdaten
- Beeinträchtigungsfreiheit/Sicherheit: Sichere und möglichst beeinträchtigungsfreie Nutzung (v. a. hinsichtlich Cybersickness) auch bei Versuchsdauern von ca. einer Stunde
- Realitätsnähe: Realitätsnahes Erleben „als ob man tatsächlich in dieser Welt sei“
- Versuchsökonomie: Höhere Kosten und Aufwände – seien es zeitliche Aufwände, Platzbedarf oder andere Kostenfaktoren – sind dann gerechtfertigt, wenn sie einen Mehrnutzen gegenüber günstigeren Alternativen bieten

6.2.2 Ablauf und Inhalte der Befragung

Der Schwerpunkt der Interviews lag auf der Beschreibung und Bewertung des jeweils bestgeeigneten VR-Systems separat für Szenario 1 und Szenario 2 (s. Tabelle 5 für eine Übersicht über Ablauf und Inhalte der Befragung). Zuerst wurde Szenario 1 vorgestellt (Punkt 2). Auf die offenen Fragen zur Gestaltung des VR-Systems (Punkt 3) folgte die standardisierte Bewertung des gerade skizzierten VR-Systems (Punkt 4). Dieses Procedere wurde anschließend für das zweite Szenario wiederholt. Die Bewertungen der Szenarien (Punkt 4) orientierten sich an den Anforderungen des in Kapitel 5.3 vorgestellten Kriterienkatalogs mit Schwerpunkt auf der Realitätsnähe des Erlebens und der Fortbewegung, während auf die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten in der Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung durch die überwiegend in anderen Fachdisziplinen verhaftete VR-Expertengruppe verzichtet wurde (stattdessen erörtert in Kapitel 6.4). Ergänzend wurden Erfahrungen und Ratschläge in Bezug auf ausgewählte Themenbereiche adressiert (Punkt 5). Zum Abschluss des Interviews wurde um

Themenblock		Inhalte
1	Einführung	Kurzvorstellung des Projekts Erkundigung nach Tätigkeitsbereich der Befragten und Schwerpunkten in VR
2	Vorstellung der Kernanforderungen und Szenarien	Vorstellung der szenarioübergreifend wichtigen Kriterien Beschreibung von Szenario 1 (gefolgt von Punkt 3 und 4) Beschreibung von Szenario 2 (gefolgt von Punkt 3 und 4)
3	Beschreibung des bestgeeigneten VR-Systems für Szenario 1 und 2	Beschreibung der technischen Umsetzung für Szenario 1 und 2 mit Fokus auf VR-Brille, Fortbewegungs- und Trackingtechnologien bzw. -komponenten Begründung der Auswahl/Nennung der Vor- und Nachteile gegenüber Alternativen Abschätzung der Kosten/Anforderungen an Versuchsumfeld (Raumgröße/-beschaffenheit)
4	Bewertung der technischen Umsetzung von Szenario 1 und 2	Ist folgendes Kriterium erfüllt, teilweise oder nicht erfüllt – und warum (nicht)? Realitätsnähe: Das VR-System ermöglicht ein hochgradig realistisches Erleben und Verhalten (in) der virtuellen Welt. Natürlichkeit der Bewegung: Die Bewegung durch die virtuelle Welt wird als natürlich empfunden. Beeinträchtigungsfreiheit: Die Nutzung des VR-Systems ist nicht unangenehm oder störend. Cybersickness tritt nicht bzw. nur in geringem Maße auf. Zugänglichkeit: Das VR-System ist für jüngere sowie ältere, rüstige Probanden mit und ohne VR-Vorerfahrung, mit und ohne Brille, etc. gleichermaßen geeignet. Bedienbarkeit: Die zur Studiendurchführung erforderlichen Schritte (bspw. Kalibrierung, etc.) sind nicht aufwändig und nach Einweisung auch ohne Vorkenntnisse gut zu bewältigen. Datenverfügbarkeit und Datengüte: Alle Verhaltensdaten sind verfügbar. Die Daten sind über die gesamte Versuchsdauer robust und fehlerfrei. (Daten-)Sicherheit: Die Nutzung des VR-Systems ist sicher und gefahrlos. Es gehen keine nutzungsbezogenen Informationen an die Hersteller der Systemkomponenten.
5	Vertiefung spezifischer Themen	Wege zur technischen Umsetzung der Smartphonennutzung in VR (sofern möglich: Lesen und Verfassen von Nachrichten) Erfahrung mit Einbindung Hochaltriger mit alterskorrelierten Einschränkungen in VR Erfahrungen mit Eye-Tracking in VR, insbesondere Analyse von Eye-Tracking-Daten in VR
6	Zukünftige technische Entwicklungen	Absehbare technische Entwicklungen in den kommenden zwei bis drei Jahren – und etwaige grundlegende Veränderungen

Tab. 5: Übersicht über Ablauf und Inhalte der Experteninterviews

eine Abschätzung zukünftiger technischer Entwicklungen in VR gebeten (Punkt 6).

Die leitfadengestützten Interviews wurden per Videokonferenz durchgeführt. Insgesamt wurden elf Interviews mit einer ungefähren Dauer von 1 bis 1 ½ Stunden geführt. Alle Teilnehmer verfügten über umfassende Erfahrung mit dem Einsatz von VR-Systemen entweder als Forschungsgegenstand oder als Forschungsinstrument, letzteres u. a. in den Bereichen Maschinenbau, Ergonomie, Human-Maschine-Interaction, Spieleentwicklung oder medizinische Anwendungen. Für die Teilnahmebereitschaft, die investierte Zeit auch über die veranschlagte Interviewdauer hinaus, das Eindenken in unseren Anwendungsfall und das Teilen des eigenen Erfahrungsschatzes bedanken wir uns herzlichst bei:

- Dietmar Bothor von der Universität Reutlingen
- Dr. Lewis Chuang vom Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund

- Ben Fischer von der University of Applied Science Düsseldorf
- Ashima Keshava von der Universität Osnabrück
- Prof. Dr. Eike Langbehn von der HAW Hamburg/ Curvature Games GmbH
- Dr. Fariba Mostajeran von der Universität Hamburg
- Maximilian Rettinger von der TU München
- Gerald Temme vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Dr. Oliver Schreer vom Fraunhofer HHI
- Linus Tiemann von der Universität Osnabrück
- Eckhart Wittstock von der TU Chemnitz

Die Interviews wurden mit dem Einverständnis der Teilnehmer aufgezeichnet. Anschließend wurden die Antworten auf die Fragen einschließlich weiterführender Erläuterungen verschriftlicht. Dabei er-

gänzten die standardisierten Bewertungen (s. Punkt 4 in Tabelle 5) die vorangegangenen Erläuterungen zu den Vor- und Nachteilen des jeweils skizzierten VR-Systems.

6.3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse der Experteninterviews beginnt mit der zusammenfassenden Übersicht über die von den Experten ausgewählten VR-Komponenten und der Beschreibung der Kriterien, die für die getroffene Auswahl maßgeblich waren (Kapitel 6.3.1). Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, möglichst allgemeingültige Empfehlungen hinsichtlich der zu verwendenden VR-Komponenten auszusprechen. Daher werden im vorliegenden Bericht nicht konkrete Modelle, die in der Regel innerhalb kurzer Zeit technisch bereits wieder veraltet sind, sondern die zugrundeliegenden technischen Merkmale und die als bedeutsam erachteten Entscheidungskriterien berichtet. Die Anzahl der Nennungen je VR-Komponente beläuft sich auf jeweils neun je Szenario⁵. Die Auswahl der einzelnen VR-Komponenten durch die Experten erfolgte mit Blick auf das Gesamtsystem und daher in Abhängigkeit zu anderen VR-Komponenten. In Kapitel 6.3.2 werden aus den teilweise heterogenen Ergebnissen von den Autoren des vorliegenden Berichts vier Systemvarianten abgeleitet, in denen sich alle genannten technischen Umsetzungen wiederfinden.

Die finale Beschreibung und Bewertung der aus den Interviews abgeleiteten Systemvarianten erfolgt in Kapitel 6.5 nach Spiegelung dieser Systemvarianten an verschiedenen Forschungsthemen der Fußgängersicherheit und -mobilität, um die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Varianten beurteilen und zur finalen Ausgestaltung der Systemvarianten nutzen zu können (s. Kapitel 6.4).

Dieser Beschreibung sind die Ergebnisse zu den Vertiefungsthemen vorangestellt (Kapitel 6.3.3 bis 6.3.5). Die Antworten zu den zukünftigen Entwicklungen fließen in den Ausblick ein (Kapitel 8). Mit Ausnahme der in Kapitel 6.3.2 vorgenommenen Ableitung der Systemvarianten gibt Kapitel 6.3 ausschließlich die Aussagen der Experten wieder.

6.3.1 VR-Komponenten und Entscheidungskriterien

Bei der Beschreibung des zur Umsetzung der beiden Szenarien bestgeeigneten VR-Systems zeichnen sich zwei unterschiedliche, jeweils ähnlich stark vertretene Ansätze ab. Die eine Hälfte sieht eine autarke VR-Brille als beste Wahl, während die andere eine kabelgebundene VR-Brille bevorzugt. In der deskriptiven Beschreibung der mit dem jeweiligen Ansatz verbundenen Vor- und Nachteile sind sich die Befragten im Großen und Ganzen einig. Es sind lediglich die Unterschiede in der Abwägung der damit verbundenen Vor- und Nachteile, die dazu führen, dass ein Ansatz dem anderen vorgezogen wird. So wird die Entscheidung für eine autarke VR-Brille primär von der damit verbundenen Bewegungsfreiheit geleitet, die sie durch die kabellose Nutzung ermöglicht. Dies passt zu der Bedeutung, die dem normalen Gehen als einhellig beste Möglichkeit zur Fortbewegung in VR zugestanden wird. Daher erfolgt die Entscheidung für eine autarke VR-Brille auch etwas häufiger beim ersten Szenario, bei dem die Möglichkeit zum normalen Gehen noch möglich, wenn auch angesichts des dafür erforderlichen Raumbedarf nicht leicht realisierbar ist. Ebenfalls betont wird der Vorteil der ortsungebundenen Nutzung, dadurch, dass keine externen Sensoren oder eine Leitführung der Kabelverbindung zwischen VR-Brille und Rechner an der Decke erforderlich sind. Somit muss kein designierter Versuchsraum eingerichtet werden, sondern es kann flexibel in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit bzw. den daran gestellten Anforderungen über den Raum entschieden werden. Die geringen Anschaffungskosten werden als positive Begleiterscheinung genannt, stellen aber kein Kriterium dar, das die Entscheidung maßgeblich beeinflusst hat.

Die mit der Verwendung einer autarken VR-Brille verbundenen Einschränkungen werden angesichts der damit verbundenen Vorteile in Kauf genommen. Aufgrund der im Vergleich zu einem leistungsfähigen externen Rechner geringeren Rechenleistung ist keine vergleichbar detailreiche Visualisierung der virtuellen Welt möglich. Diese Einschränkung wird wiederholt dahingegen relativiert, dass die Bildqualität immer noch hinreichend sei. Gerade bei sehr großen Welten (wie bspw. Szenario 2) oder bei hohem Detailreichtum kann jedoch ein autarkes

⁵ Zwei Interviews folgten nicht dem entwickelten Leitfaden. Bei einem handelte es sich um ein themenspezifisches Interview, bei dem anderen wurde eine Realisierung insbesondere des ersten Szenarios mittels VR-Brille als generell ungeeignet eingestuft, solange das FOV der VR-Brillen auf den Bereich von ca. 110 – 130° beschränkt bleibt, und stattdessen auf einen projektionsbasierten Ansatz verwiesen.

	Autarke VR-Brillen		Kabelgebundene VR-Brillen	
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1	Szenario 2
Häufigkeit der Nennung	5	3	4	6
Kabellos nutzbar	ja		Nur mit Wireless Adapter oder Rucksacklösung	
Kosten	Gering: Kein externer Rechner/Sensoren nötig, aber möglich		Hoch: leistungsfähiger Rechner mit hochwertiger Grafikkarte Ausstattung des Raumes mit externen Sensoren erforderlich Kosten steigen mit Raumgröße	
Ortsungebundene Nutzung möglich	ja		nein	
Visuelle Erlebnisqualität	Eingeschränkt (keine Echtwelтанforderung) Contentabhängige Probleme mit Prozessor möglich		Hohe visuelle Erlebnisqualität (größeres FOV, bessere Auflösung)	
Robustheit und Datengüte	Tracking (etwas) ungenauer		Tracking exakter und Aussetzer selten, sofern hohe Anforderungen an externe Komponenten (Rechner, Sensoren) erfüllt Steigt mit Anzahl externer Sensoren	

Tab. 6: Gründe für und gegen die Verwendung autarker bzw. kabelgebundener VR-Brillen

System an Grenzen stoßen. Zudem gilt das Tracking als weniger akkurat als bei kabelgebundenen VR-Brillen. Ausmaß und Bedeutsamkeit dieser eingeschränkten Trackinggenauigkeit lassen sich schwer abschätzen. Einerseits gilt es im Großen und Ganzen als hinreichend akkurat für die gegebenen Szenarien, andererseits wurden auch schon erhebliche Abweichungen von bis zu einem halben Meter auf einer Strecke von weniger als 10 Metern bei Verwendung einer (nicht im Rahmen der Befragung vorgeschlagenen) autarken VR-Brille berichtet. Eine Übersicht über die erörterten Kriterien zeigt Tabelle 6.

Diejenigen Experten, für die eine kabelgebundene VR-Brille die erste Wahl darstellt, begründen ihre Entscheidung in erster Linie mit der höheren visuellen Erlebnisqualität. Die relevanten Aspekte sind zum einen der damit verbundene Detailreichtum der virtuellen Welt und zum anderen – bei Wahl eines konkreten Modells – ein besonders großes, zumindest annäherungsweise realistisches FOV. Darüber hinaus werden die Robustheit (geringere Wahrscheinlichkeit für Aussetzer) und die Genauigkeit des Trackings als Vorteile betont. Damit verbunden sind jedoch Investitionen in zusätzliche Gerätschaften, darunter ein leistungsfähiger Rechner mit hochwertiger Grafikkarte (erläutert in Kapitel 6.5.2) sowie die Ausstattung des Raums mit Lighthouse-Stationen, um die Position der Probanden tracken zu können. Die Anzahl der erforderlichen Lighthouse-Stationen, die einen Radius von ca. 10 m abstrahlen, hängt von der Raumgröße ab.

Eine geringe Anzahl und größere Entfernung sind erfahrungsgemäß etwas weniger akkurat und anfälliger für Verdeckungen. Ein Raum bis etwa 9 x 9 m kann mit mindestens zwei, besser jedoch vier Lighthouse-Stationen abgedeckt werden. Maximal 16 Lighthouse-Stationen können miteinander verbunden werden. Für einen Raum mit einer Diagonalen von ca. 50 m – der in Szenario 1 mindestens erforderlichen Strecke – genügt das theoretisch. Praktisch erprobt wurde es seitens der Befragungsteilnehmer jedoch nicht auf einer Strecke, die über 25 m (mit vier Lighthouse-Stationen hinreichend abgedeckt) hinausgeht. Eine Alternative, die nachweislich auch bei großen Arealen ein sehr exaktes Tracking ermöglicht, wäre das kamerabasierte Outside-In-Tracking. Die damit verbundenen Kosten belaufen sich schätzungsweise auf einen fünfstelligen Bereich mittlerer Höhe.

Prinzipiell kann auch eine autarke VR-Brille in Verbindung mit dem Lighthouse-System eingesetzt werden, um mit vergleichsweise einfachen Mitteln ein Körpertracking durchzuführen (wie nachfolgend noch erläutert, s. Tabelle 8) oder eine höhere Trackinggenauigkeit zu erzielen. Der Vorteil der flexiblen ortsungebundenen Nutzung wäre damit jedoch hinfällig, während die Bewegungsfreiheit infolge der kabellosen Nutzung noch erhalten bliebe. Diese ist im Falle der kabelgebundenen VR-Brille nur unter bestimmten Umständen gegeben. Der Einsatz eines Wireless Adapter ermöglicht die kabellose Nutzung auch kabelgebundener VR-Brillen. Damit ist man jedoch zum einen auf den Einsatz einer VR-

Brille festgelegt, die diese Möglichkeit bietet. Zum anderen ist dessen Reichweite nicht unbegrenzt. Auf 10 m funktioniert es erfahrungsgemäß gut, während die Eignung für eine Distanz von 20 m oder mehr – wie für Szenario 1 in Verbindung mit einer natürlichen Fortbewegung erforderlich – nicht als gesichert gilt. Wenn der Einsatz funktioniert, muss – wie bei autarken VR-Brillen auch – die Akkulaufzeit sowie das nicht unerhebliche Zusatzgewicht des Wireless Adapter berücksichtigt werden. Beides verkürzt die technisch realisierbare bzw. zumutbare Versuchsdauer. Eine Alternative zum kabellosen Einsatz ist die Verwendung eines Rucksacks, bei dem das Kabel der VR-Brille zu dem darin befindlichen Rechner führt. Für diesen Einsatzzweck gibt es bereits fertige Lösungen, die bei längeren Versuchsdauern oder engen zeitlichen Staffellungen der Versuchsdurchführung den Wechsel der Akkus im laufenden Einsatz mit wenigen Handgriffen ermöglicht.

Von den Experten wurden folgende Kriterien bei der Auswahl einer bestimmten autarken bzw. kabelgebundenen VR-Brille berücksichtigt:

- Aspekte der visuellen Erlebnisqualität, insbesondere die Auflösung und ein großes, möglichst realitätsnahes FOV
- Güte des Trackings (hier augenscheinliche Unterschiede zwischen verschiedenen autarken VR-Brillen)
- Verlässlichkeit in der Anwendung
- Vermeidung etwaiger Datenschutzproblematiken (mitunter über die Entscheidung für die Businessversion behebbar).
- eine breite Erfahrungsbasis und guter Support als Folge einer weiten Verbreitung des Modells
- eine Option zur kabellosen Nutzung durch die Verfügbarkeit geeigneter Adapter bei eigentlich kabelgebundenen VR-Brillen

Die Nennungen der Expertengruppe bezüglich der präferierten Fortbewegungstechnik zeigt Tabelle 7. Als bestmögliche Fortbewegungstechnik gilt eindeutig die Ermöglichung des normalen Gehens. Diese ist laut Experten nicht nur die natürlichste und immersivste Methode, welche die validesten Ergebnisse erzeugt, sondern sie birgt auch die geringste Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Cybersickness. Auf alternative Fortbewegungstechniken wird daher nur ausgewichen, wenn die fehlende Möglichkeit zur Umsetzung des normalen Gehens in der

eigenen Entscheidung vorweggenommen wird. Dies ist vor allem im zweiten Szenario der Fall, in dem die virtuelle Welt ungleich größer ausfällt als die im ersten Szenario erforderliche Strecke von ca. 50 m. Als Nachteile der Methode erscheinen neben Sicherheitsbedenken bei Einbindung älterer Probanden vor allem pragmatische Aspekte, so der erhebliche Raumbedarf (Halle mit einer Laufdiagonalen von 50 m) und bei Entscheidung gegen eine autarke VR-Brille die zusätzlichen Kosten zur Ausstattung der gesamten Halle mit externen Gerätschaften zum Tracking und der Umsetzung der Bewegungsfreiheit – ein wichtiger Aspekt der natürlichen Fortbewegung – trotz Einsatz kabelgebundener VR-Brille (bspw. über die vorab erläuterte Rucksacklösung).

Trotz der starken Präferenz für eine natürliche Fortbewegung wird die Methode des Redirected Walking nur selten genannt, um auch in großen virtuellen Welten ein weitgehend normales Gehen zu ermöglichen. Generell ist diese Methode zumindest im Forschungsbereich nicht sonderlich verbreitet, und wird in Studien derzeit eher als Forschungsgegenstand betrachtet, während bei Anwendungen aus dem Unterhaltungsbereich häufiger auf das gesamte Methodenrepertoire dieser Technik zurückgegriffen wird (s. Kapitel 3.1.4). Nachteilig ist auch hier der erhebliche Raumbedarf. So erfordert ein unbegrenztes Geradeauslaufen bei Führung im Kreis einen Durchmesser von ca. 20 m. Zöge man den Kreis merklich enger, wäre ein erhebliches Ausmaß an Cybersickness die Folge. Eine solide technische Umsetzung des Redirected Walking ist alles andere als trivial und erfordert neben erheblichem Aufwand auch technische Expertise. Nicht zuletzt kann eine zumindest geringfügige Beeinträchtigung gehbezogener Maße durch die abweichenden Trajektorien in realer und virtueller Welt nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Die vor allem beim zweiten Szenario genannten Fortbewegungstechniken sind als Methoden zweiter Wahl nach dem normalen Gehen anzusehen und zeigen keine einstimmige Präferenz. Die meisten Nennungen entfallen auf den Controller. Hier erfolgt die Fortbewegung modellabhängig über ein Touchpad, einen Steuerknüppel oder aber über einen Knopf, den man zur Fortbewegung drückt und zum Anhalten loslässt. Dabei bewegt man sich in die Richtung, in die man blickt. Die individuelle Gehgeschwindigkeit der Probanden in der realen Welt ließe sich in der virtuellen Welt dadurch abbilden, dass man sie vor Versuchsbeginn erfasst und den

Technik	Szenario		Eigenschaften
	1	2	
Normales Gehen	7	-	<ul style="list-style-type: none"> • Natürlich und hochgradig immersiv • Valideste Ergebnisse • Geringstmögliche Cybersickness im Vergleich zu allen anderen Fortbewegungstechniken • Hoher Platzbedarf und hohe Kosten • Uneingeschränkt natürliche Fortbewegung setzt kabelungebunde Nutzung (autarke Brille oder Rucksacklösung) voraus
Controller	1	4	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfach und kostengünstig umsetzbar • erhebliche Cybersickness erwartbar • erfordert Vorabtraining gerade bei VR-/Spielkonsolenerfahrenen Probanden
Sensorschuhe	1	2	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger Cybersickness als Controller, mehr als normales Gehen • Ungefähre Abbildung von Gehbewegungen möglich • Präzisere Erfassung der Schritte als bei Rundplattformen
Redirected Walking	-	2	<ul style="list-style-type: none"> • Weitgehend natürliche Fortbewegung durch normales Gehen samt weitgehend realistischer gehbezogener Maße • Hoher Platzbedarf • Aufwand und Expertise erforderlich zur Umsetzung • Außerhalb von Methodentests bislang keine Verwendung in Studien
Rundplattform	-	1	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger Cybersickness als Controller, mehr als normales Gehen • Gehbewegung unnatürlich (eher Rutschen als Laufen) • Einengend

Tab. 7: Anzahl der Nennungen der ausgewählten Fortbewegungstechniken und ihre Vor- und Nachteile

Controller entsprechend eicht. Insgesamt gilt ein Controller eine leicht verfügbare und sichere Lösung, die keine körperliche Anstrengung erfordert. Gerade für Probanden ohne Erfahrung mit Computerspielen kann dessen Nutzung jedoch mit einigen Schwierigkeiten verbunden sein. Ein vorhergehendes Training ist daher essenziell, kann jedoch nicht garantieren, dass die Bedienung anschließend ähnlich leicht von der Hand geht wie bei einschlägig vorerfahrenen Probanden. Ein gelegentliches Übersteuern ist eine mögliche Folge. Von allen Fortbewegungstechniken ist die Verwendung des Controllers mit der größten Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Cybersickness verbunden, vor allem bei häufigen Drehungen in der virtuellen Welt. Abschwächen lässt sich diese Wahrscheinlichkeit durch die Nutzung im Sitzen sowie durch eine – mit Blick auf die Realitätsnähe der visuellen Wahrnehmung oftmals unerwünschte – Begrenzung des FOV.

Angesichts der Bedeutung, die dem normalen Gehen zugestanden wird, hätte man wohl eher eine eindeutigere Empfehlung für das Laufband erwartet. Dies wird jedoch nicht als gute Alternative zum normalen Gehen eingeordnet. Einhellig wird betont, dass damit keine natürliche Fortbewegung möglich ist. Es sei eher ein „Gehen wie auf Kiesel“, ein „Rutschen“ oder „Schlittschuhfahren“. Die Bewer-

tung der Fortbewegung als unnatürlich wird auch den kostenintensiven Laufbändern zugeschrieben, und ist nicht auf die in den Interviews einmal genannte Rundplattform beschränkt. Der begrenzte Platz und die rutschige Oberfläche machen die Verwendung einer rigiden Sicherung erforderlich, die wiederum stark einengt. Trotz all dieser Nachteile sind sie eine denkbare Kompromisslösung, die auch ein immersives Erleben ermöglichen. Häufiger wird jedoch eine einfache Nachahmung der Schrittbewegung vorgezogen. Sensorschuhe als überziehbare Sohlen in Einheitsgröße ermöglichen eine 360°-Erfassung der Schrittbewegung, die aus dem Sitzen auf einem drehbaren Stuhl heraus erfolgt. Die Möglichkeit, sich entsprechend mitzudrehen, führt zu einer Abschwächung von Cybersickness, die jedoch immer noch häufiger auftritt als beim normalen Gehen. Die Technik, so unnatürlich sie auch anmuten mag, ermöglicht zumindest eine ungefähre Abbildung der Schrittlänge und der Gehschwindigkeit. Im direkten Vergleich sollen die Sensorschuhe dahingehend sogar etwas präziser die Gehbewegung abbilden als eine Rundplattform.

Die Frage zur technischen Umsetzung des Trackings, das eine Ausweichbewegung – den Schritt zur Seite – erfassen und am virtuellen Selbst darstellen kann, folgte auf die Beschreibung des für das erste Szenario bestgeeigneten VR-Systems.

Komponente	Anzahl	Eigenschaften
Befestigung von Trackern am Körper	5	<ul style="list-style-type: none"> • Akkurate Erfassung auf ca. 5 cm genau • Ergänzung um IK empfehlenswert • Physisch robust • Günstig, setzt Lighthouse-Tracking voraus
Optisches kamerabasiertes Tracking	1	<ul style="list-style-type: none"> • Präzisestes Tracking auch in großen Arealen • Kostenintensiv: Preis steigt mit Größe des überwachten Raums
Inertialanzug	1	<ul style="list-style-type: none"> • Inertialbasierte Erfassung hinreichend exakt und vergleichsweise (vs. kamerabasiertes Tracking) günstig • Anpassung an Körpergröße möglich bzw. notwendig (vier Größen verfügbar)
Sensorschuhe	1	<ul style="list-style-type: none"> • Ermöglicht Fußtracking • Einfache und verfügbare Lösung, vorausgesetzt, es ist die Fortbewegungstechnik der Wahl • Geringe Latenz • Unisize
Positionstracking der (autarken) VR-Brille	1	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach und günstig • Ohne Zusatzgerät umsetzbar

Tab. 8: Anzahl der Nennungen der ausgewählten Technologien zur Erfassung einer Ausweichbewegung und ihrer Eigenschaften

Eine Übersicht über die Ergebnisse zeigt Tabelle 8. Die einfachste und günstigste, jedoch trotzdem als hinreichend angesehene Lösung, stellt die Erfassung der Ausweichbewegung über das Positionstracking der VR-Brille dar. Vorgeschlagen wurde sie bei Wahl einer autarken VR-Brille, ist jedoch unabhängig von der Autarkie der VR-Brille ohne jedwede Zusatzkomponenten einsetzbar. Dies gilt in gleicher Weise für die Erfassung des Ausweichschritts über die Sensorschuhe, sofern man sich für diese Fortbewegungstechnik entschieden hat. Im Gegensatz zum kopfpositionsbasierten Schließen auf eine Ausweichbewegung des Körpers lässt sich hier die Schrittbewegung zur Seite konkret erfassen. Die akkuratere, aber mit Abstand kostspieligste Lösung ist das Tracking mittels im Raum installierter Kameras, die die Position des Probanden und seiner Bewegung erfassen, unterstützt durch am Körper angebrachte Marker. Zur Einordnung dieses Vorschlags muss berücksichtigt werden, dass diese Methode bereits als Element des VR-Systems skizziert wurde, um ein Positionstracking bei normalem Gehen in einem großen Areal zu ermöglichen.

Die meisten Nennungen entfallen auf die Verwendung einfacher Tracker, die entwickelt wurden, um Attrappen der realen Welt orten und in der virtuellen Welt darstellen zu können. Sie werden vorzugsweise mit Bändern samt Spannvorrichtung (nicht mit Klettverschlüssen, die leicht verrutschen) am Körper befestigt. Für die Abbildung eines Ausweichschritts genügt je ein Tracker am Fußgelenk. Mit einem weiteren Tracker an der Hüfte und je einem am Handgelenk lässt sich ein hochgradig realitätsgetreues virtuelles Abbild des Probanden in die virtuel-

le Welt bringen, vor allem bei unterstützendem Einsatz einer inversen Kinematik (IK). Die sorgt dafür, dass von wenigen Messpunkten auf die Bewegung eines Körperteils bzw. des gesamten Körpers geschlossen wird. Die Position der Tracker wird von den umgebenden Lighthouse-Stationen erfasst. Je zahlreicher die Stationen, desto weniger kritisch sind auch etwaige Verdeckungen.

Greift die verwendete VR-Brille bereits zum Positionstracking auf das Lighthouse-System zurück, so werden lediglich Zusatzkosten für die Tracker am Körper fällig. Bei Verwendung einer autarken VR-Brille ist die Entscheidung für diese Tracker eine vergleichsweise größere Investition, zumal sie einige der Vorteile (raumungebundene Nutzung, unabhängig von externen Gerätschaften) zunichtemacht. Nichtsdestotrotz ist diese Lösung technisch umsetzbar und kann auch zur Verbesserung der Genauigkeit des Positionstrackings eingesetzt werden. Eine Alternative, welche die Vorteile einer autarken VR-Brille erhält, ist die Verwendung eines mit Inertialsensoren ausgestatteten Anzugs. Die kleinen und leichten Sensoren ermöglichen eine hinreichend exakte Erfassung, allerdings dürfte die für Probandenstudien erforderliche Anpassung an unterschiedliche Körpergrößen vermutlich die Anschaffung des Anzugs in allen vier verfügbaren Größen erforderlich machen.

6.3.2 Varianten von VR-Systemen

Abstrahiert man von den Einzelkomponenten auf die ihnen zugrundeliegenden Entscheidungskriterien, stehen hinter den verschiedenen Optionen bei

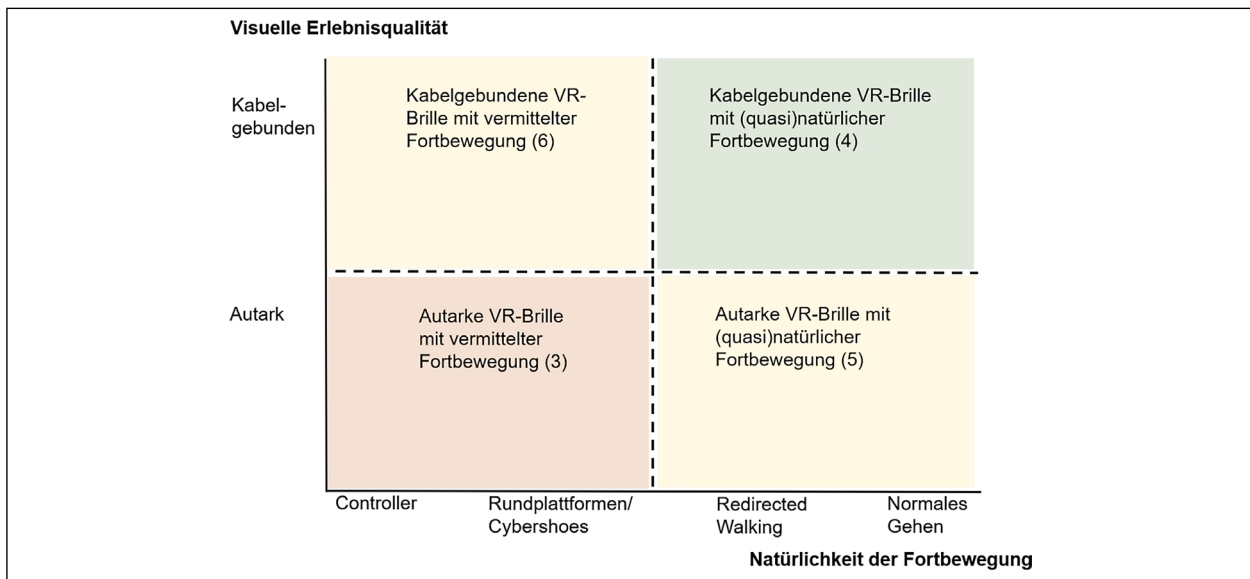


Bild 3: Schematische Skizze der vier vorgeschlagenen Systemvarianten und Anzahl der szenarioübergreifenden Nennungen

der Wahl der VR-Komponente nur wenige distinkte Systemvarianten. Diese Varianten unterscheiden sich in dem Ausmaß, in dem sie die beiden Aspekte der Realitätsnähe erfüllen, die aus Expertensicht besonders bedeutsam sind. Dabei handelt es sich zum einen um die Natürlichkeit der Fortbewegung, da mit steigender Nähe zum normalen Gehen die virtuelle Erfahrung immersiver und das Auftreten von Cybersickness weniger wahrscheinlich wird, und zum anderen um die visuelle Erlebnisqualität, die bei autarken VR-Brillen geringer ausfällt als bei kabelgebundenen⁶. Die unterschiedlichen Facetten der visuellen Erlebnisqualität, die für die Entscheidung über das Modell der VR-Brille maßgeblich werden, werden bei der konkreten Ausgestaltung des Systems berücksichtigt (s. Kap 6.5).

Trennt man bei dem Aspekt der natürlichen Fortbewegung zwischen vermittelten Techniken (Controller, Sensorschuhe, Rundplattform) und der (weitgehend) natürlichen Fortbewegung, die eine Bewegung durch den Raum auf unbewegtem Grund ermöglichen (normales Gehen, Redirected Walking), ergeben sich vier Varianten (vgl. Bild 3):

- Eine Variante mit autarker VR-Brille und vermittelter Fortbewegung, die in beiden Dimensionen Abstriche macht
- Zwei Middle Fidelity-Varianten, bei denen entweder Einschränkungen bei der visuellen Erlebnisqualität oder der Natürlichkeit der Fortbewegung hingenommen werden

Visuelle Erlebnisqualität	Fortbewegung	Szenario 1	Szenario 2
Eingeschränkt (Autark)	Vermittelt	1	2
	Natürlich	4	1
Hoch (Kabelgebunden)	Vermittelt	1	5
	Natürlich	3	1

Tab. 9: Anzahl der Nennungen je Systemvariante und Szenario

- Eine High Fidelity-Variante, die beide Aspekte erfüllt, sofern trotz der Kabelgebundenheit eine gute Bewegungsfreiheit gewährleistet werden kann

Die vier Varianten stellen eine stark vereinfachende Beschreibung, gerade in Hinsicht auf die Dichotomisierung der visuellen Erlebnisqualität (hoch vs. gering $\hat{=}$ kabelgebunden vs. autark) dar. Die konkrete Ausgestaltung samt differenzierter Erörterung des Merkmalprofils über die hier genannten beiden Dimensionen hinaus erfolgt in Kapitel 6.5.

Betrachtet man die Anzahl der szenariobezogenen Nennungen dieser Varianten, so werden die beiden Systemvarianten, die eine (quasi-)natürliche Fortbewegung ermöglichen, klar präferiert, solange diese noch – wenn auch mit hohem Aufwand – realisierbar erscheinen (s. Tabelle 9, Szenario 1). Dahingegen entscheiden sich die meisten Experten zur Umsetzung des zweiten Szenarios für die kabelgebundene Variante mit vermittelter Fortbewegung.

⁶ Autarkie hat noch andere Implikationen, s. Robustheit & Datengüte. Hier auf den zentralen, einhellig genannten Unterschied kondensiert

Die wenigsten Nennungen entfallen auf die Variante, die Abstriche in beiden Aspekten macht. Dabei verfügt auch sie über nicht zu verachtende Vorteile. Sie ist kostengünstig, frei von störenden Kabeln und raumungebunden nutzbar. Der Einsatz im Sitzen (Controller oder Sensorschuhe) oder mit rigider Sicherung (Rundplattform) bannt die Gefahr etwaiger Stürze. Wenn keine Echtwelтанforderungen an die visuelle Erlebnisqualität oder die Fortbewegung gestellt werden, stellt sie eine machbare Alternative dar⁷.

Angesichts der höheren Realitätsnähe im Erleben und Agieren (in) der virtuellen Welt lassen die drei anderen Varianten weniger Einschränkungen in Hinsicht auf die Validität der Ergebnisse erwarten und verbleiben daher im relevanten Set möglicher Umsetzungen. Mit diesen drei möglichen Varianten – dem autarken VR-System, dem laborgebundenen und dem High Fidelity-System – stellt sich nun die Frage, wofür man sich entscheiden sollte. Dazu werden nachfolgend zwei Entscheidungshilfen gegeben. In Kapitel 6.4 werden die Einsatzmöglichkeiten der drei Varianten mit Blick auf unterschiedliche Forschungsthemen der Sicherheits- und Mobilitätsforschung betrachtet. Anschließend werden die drei Systemvarianten beschrieben und bewertet (s. Kapitel 6.5). Beidem vorangestellt werden jedoch noch die Ergebnisse aus den Interviews zu den speziellen Themen, die sich bei Umsetzung eines VR-Systems für die Sicherheits- und Mobilitätsforschung in der Praxis stellen. Dazu gehören die Erfahrungen mit dem Einsatz von Eye-Tracking, die Einbindung Hochaltriger sowie Möglichkeiten zur technischen Umsetzung der Smartphonennutzung in VR.

6.3.3 Erfahrung mit Eye-Tracking in VR-Systemen

VR-Brillen verfügen mitunter über Eye-Tracking, um foveales Rendering zu ermöglichen, d. h. die jeweils fokussierten Bereiche scharf darzustellen. Damit soll eine höhere visuelle Erlebnisqualität bei geringerer Rechenleistung ermöglicht werden. Die Erfassung von Indikatoren des Blickverhaltens als interpretierbare Messgrößen ist nichtsdestrotz möglich, wenn auch nicht der damit intendierte Anwendungsfall. Binnen der Expertenrunde wird auch selten von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht. Vergleichsweise häufiger greift man auf Eye-Track-

ing zurück, um Interaktionen blickbasiert auszulösen.

In vielen Aspekten ähneln die Erfahrungen mit Eye-Tracking in VR denen mit externen, d. h. nicht in VR-Brillen eingebundenen, Eye-Tracking-Systemen. Die Kalibrierung ist recht einfach und funktioniert oft gut, jedoch nicht bei allen Probanden (insbesondere Brillenträgern). Wurde die Kalibrierung einmal durchgeführt, bleibt sie auch für Versuchsdauern von 30 Minuten und mehr stabil, solange keine intensiven Bewegungen erforderlich sind und die VR-Brille verrutscht. Die Genauigkeit der ansonsten akkuraten Blickerfassung leidet erheblich bei extremen horizontalen oder vertikalen Blickbewegungen⁸. Aus eben jener Studie geht auch hervor, dass es in Bezug auf die Akkuratheit des Eye-Trackings erhebliche Unterschiede zwischen VR-Brillen geben kann. Beim Vergleich zweier Modelle unterschiedlicher Hersteller erweist sich das Tobii-basierte Eye-Tracking der HTC Vive als in allen betrachteten Maßen überlegen. Vergleichbare systematische Gegenüberstellungen zu weiteren VR-Brillen liegen nicht vor bzw. sind nicht bekannt.

Wie eingangs erwähnt, ist die Erfassung und Auswertung von blickbezogenen Maßen möglich, aber unüblich. Dies mag ein Grund dafür sein, dass die Erfassung und Auswertung der Blickdaten mit einigen Herausforderungen verbunden sind. So kann eine verlässliche Erfassung der Blickdaten und deren unmittelbare Speicherung auf der Festplatte mitunter nicht gewährleistet werden. Eine mögliche Lösung ist es, die Blickdaten während des laufenden Versuchs im RAM zu halten und erst nach Beenden des Szenarios auf der Festplatte zu speichern. Dies erfordert zum einen eine Begrenzung der Szenarien auf ca. 15 Minuten sowie einen äußerst leistungsfähigen Rechner mit entsprechend komfortablen Arbeitsspeicher-Reserven von mindestens 32 GB, besser 64 GB. Um die Rohdaten in interpretierbare Maße zu überführen, ist eine aufwändige und nicht ganz triviale Vorverarbeitung erforderlich. Der zur Generierung interpretierbarer Blickmaße erforderliche Aufwand liegt demzufolge noch über dem von externen Eye-Tracking-Systemen bekannten, wenn auch die Anschaffungskosten mit einem niedrigen dreistelligen Betrag deutlich geringer ausfallen.

⁷ Bspw. bei Forschungsthemen, bei denen sowohl der Einsatz des anderen autarken Systems oder die kabelgebundene Variante mit vermittelter Fortbewegung denkbar wären (s. Kapitel 6.4)

⁸ Eine Quantifizierung dieser Abweichungen zeigen beispielsweise Keshava et al. (2021).

6.3.4 Einbindung von Hochaltrigen in VR-Studien

Die seitens der Expertenrunde in VR eingebundene Nutzergruppe ist überwiegend heterogen und umfasst neben VR-erfahrenen Studenten oder Designerinnen alle Altersgruppen im erwerbspflichtigen Alter. Erfahrungen mit der Einbindung von Hochaltrigen in VR liegen vor, bspw. bei VR-Demonstrationen für die interessierte Öffentlichkeit, bei altersübergreifenden Spieleanwendungen oder auch im Bereich medizinischer Anwendungen, sind jedoch deutlich weniger umfassend. Den Erfahrungen der Experten zufolge stellt das höhere Alter per se kein Problem dar, solange man der Technologie gegenüber aufgeschlossen ist. Problematisch hingegen ist eine Einschränkung des Stereosehens, das dazu führt, dass die virtuelle Welt als unangenehm erlebt wird. Auch die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Fortbewegung in der virtuellen Welt sind mit jeweils unterschiedlichen Herausforderungen verbunden. Die Fortbewegung mit Controllern ist nicht intuitiv und muss vor der intendierten Anwendung gut erlernt werden. Beim normalen Gehen hingegen – und auf dem Laufband – können Gleichgewichtsstörungen auftreten. In diesem Falle neigen Probanden dazu, sich an einem in VR stabil wirkenden Objekt festzuhalten. Wenn dieses virtuelle Objekt keine stabile physische Entsprechung hat, greifen sie ins Leere und stürzen. Daraus lässt sich die Empfehlung ableiten, Haltemöglichkeiten in der realen Welt mit virtueller Entsprechung zu schaffen, die sich in beiden Welten mitbewegen bzw. in kurzen Abständen verfügbar sind. Darüber hinaus kann der Übergang zwischen realer und virtueller Welt erfahrungsgemäß dadurch erleichtert werden, dass beim Tragen der VR-Brille vor dem Start bzw. nach dem Ende der Simulation die reale Welt durch die VR-Brille hindurch sichtbar bleibt. Dazu zeichnen die in der VR-Brille integrierten Kameras (sofern vorhanden) die Umgebung auf und stellen sie auf dem Display der VR-Brille dar. Diese Technik bezeichnet man als VR Pass-through (vgl. Tabelle 3 in Kapitel 4 zum Einsatz dieser Technik in Fahrsimulatorstudien).

6.3.5 Umsetzungsmöglichkeiten der Smartphonennutzung in VR

Zur Umsetzung der Smartphonennutzung in der virtuellen Welt, einschließlich des Lesens und Verfassens von Nachrichten, gibt es unterschiedliche Wege. Voraussetzung ist die Anzeige eines Smartphonebildschirms in der virtuellen Welt, der Eingaben

des Probanden ermöglicht und möglichst zeitnah visualisiert. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Mockups mit Touchpad, für das ein virtuelles Gegenstück geschaffen wird, und dessen Position getrackt wird. Die in Kapitel 6.3.1 beschriebenen, mittels Gurten am Körper zu befestigenden Tracker, die eine einfache und hinreichend exakte Abbildung zur Schaffung eines realistischen Avatars bieten, wären – da für diesen Anwendungsfall vergleichsweise klobig – dafür nur eingeschränkt geeignet. Alternativ ließe sich auch auf das Mockup gänzlich verzichten. Dafür beschränkt man sich auf die Anzeige eines Smartphonebildschirms in der virtuellen Welt, und erfasst die darauf getätigten Eingaben mittels Handtracking. Gegebenenfalls kann man die Probanden eine Handposition einnehmen lassen, die dem Halten eines Smartphones entspricht.

Die meistgenannte und aus Expertensicht mutmaßlich einfachste Lösung ist jedoch die Nutzung eines echten Smartphones samt Spiegelung des Bildschirmes in der virtuellen Welt. Dabei müssen verschiedene Aspekte beachtet werden. Zum einen muss gegebenenfalls die Schrift vergrößert werden, um lesbar zu sein. Da die Tasten eines Smartphones modellübergreifend recht klein ausfallen, muss man möglicherweise vom Smartphone auf ein Tablet ausweichen, um Eingaben verlässlich nachvollziehen zu können – oder sich aber auf die Auswahl vorgegebener Wörter oder vergleichbarer Lösungsansätze beschränken. Zum anderen wird die Bedeutung einer möglichst geringen Latenz von der Eingabe bis zur Anzeige betont. Aus dem Grund wird die Verwendung eines 5G-fähigen Smartphones nachdrücklich empfohlen. Das Erfassen der Eingaben setzt ein Handtracking voraus. Ob ein VR-Brillenbasiertes Handtracking dafür akkurat genug ausfällt, ist aus Sicht der Experten fraglich. Die kostengünstige Alternative ist die Verwendung eines Controllers, mit dem die Tastenbedienung durch einen Finger simuliert werden kann, während die Verwendung eines Datenhandschuhs kostenintensiver ist. Die hier aufgezeigte Spiegelung eines echten Smartphones in der virtuellen Welt gilt auch deswegen als unaufwändiger als andere Lösungen, da dafür bereits einfache und günstige technische Lösungen entwickelt wurden, um bei freizeitorientierten Tätigkeiten in VR das eigene Smartphone weiter nutzen zu können. Etwaige forschungsbezogene Anwendungen sind nicht bekannt. Bei den hier aufgezeigten Optionen handelt es sich um eine theoretische Erörterung unterschiedlicher Möglich-

keiten, die zumindest binnen der Expertenrunde noch nicht praktisch erprobt wurden.

6.4 Abschätzung der Verwendbarkeit der Varianten für die Verhaltensforschung bei Fußgängern

Aus der Expertenbefragung wurden drei Systemvarianten abgeleitet: Ein autarkes, ortsungebunden einsetzbares und kostengünstiges System mit Einschränkungen in der visuellen Erlebnisqualität, ein laborgebundenes System mit hoher visueller Erlebnisqualität bei geringem Platzbedarf aufgrund der vermittelten Fortbewegung sowie ein High Fidelity-System, das die Anforderungen an eine hohe visuelle Erlebnisqualität und eine natürliche Fortbewegung vereint, aber aus versuchsökonomischen Gründen nicht leicht umzusetzen ist. Dies wirft die Frage auf, inwiefern diese High Fidelity-Variante zwingend erforderlich erscheint, und wann eine der beiden anderen Systemvarianten trotz der damit verbundenen Abstriche hinsichtlich der Realitätsnähe eine hinreichende Alternative bietet. Eng verbunden damit ist die Frage, ob diese beiden Varianten eine breite Verwendbarkeit für unterschiedliche Einsatzzwecke bieten oder ob sie sich nur für wenige spezielle Fragestellungen eignen. Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine Übersicht über mögliche Forschungsthemen und deren zentrale Anforderungen an die technische Umsetzung erstellt. Auf Basis dieser Übersicht wurde abgeleitet, welche Systemvariante hinreichend geeignet erscheint. Des Weiteren ließ sich eine ungefähre Gewichtung der Anforderungen vornehmen, die anschließend in die Wahl der VR-Brille (s. Kapitel 6.5.1) einfließt.

Dazu wurde im ersten Schritt eine Übersicht über Forschungsthemen erstellt. Publikationen aus Forschungsdatenbanken, die mit den Begriffen „pedestrian“ und „behavio(u)r“ verschlagwortet waren, wurden gesichtet und die Themen mit Bezug zur Sicherheits- und Mobilitätsforschung von Fußgängern aufgenommen. Ergänzend wurden die in kommunalen Plänen zur Verkehrsgestaltung für Fußgänger⁹ aufgeführten Zielsetzungen und Maßnahmen in Forschungsthemen übersetzt. Aus der Übersicht ausgeschlossen wurden die Themenbereiche, die einer experimentellen Verhaltensforschung per se (bspw. Einstellung zu bestimmten Sachverhalten) oder einer Umsetzung in VR (bspw. bei Einbindung

von Kindern bis zwölf Jahre, für die herstellerseitig der Einsatz von VR-Brillen nicht empfohlen ist) möglicherweise nicht zugänglich sind. Bei den verbleibenden Themenbereichen wurde festgehalten, ob eine experimentelle VR-Studie folgende inhaltliche Anforderungen an ein VR-System stellt:

- Gibt es hohe Anforderungen an die visuelle Erlebnisqualität, insbesondere an die Wahrnehmbarkeit peripherer Informationen (hohes FOV erforderlich) oder an die Lesbarkeit von Informationen (realitätsnahe Auflösung erforderlich)?
- Ist eine natürliche Fortbewegung essenziell (und nicht nur wünschenswert zur höheren Immersion), bspw. zur Ableitung gehbezogener Maße?
- Ist ein Hand- bzw. Körpertracking erforderlich (und nicht nur wünschenswert für eine realistische Selbstrepräsentation in der virtuellen Welt), um Körperbewegungen oder Gesten ableiten zu können?
- Würde man sich die Option offenhalten, Eye-Tracking zur Erfassung und Interpretation des Blickverhaltens einzusetzen?
- Stellt das Forschungsthema besondere Erfordernisse an die Gewährleistung der Sicherheit der Probanden?
- Genügt eine kleine virtuelle Welt, bei der sich die zwingend erforderliche Raumgröße auf eine begehbare Diagonale von ca. 5 m beschränken lässt, so dass sich die beiden Kernanforderungen an Realitätsnähe trotz eingeschränkter Platzverfügbarkeit vereinen lassen?

Die finale Einordnung spiegelt die aus den genannten Themenbereichen abgeleitete Einschätzung der Autoren wider. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bestimmte konkrete Fragestellungen binnen der aufgeführten Forschungsthemen davon abweichende Anforderungen stellen. Die ursprünglich intendierte Erfassung besonderer Erfordernisse bezüglich der Beeinträchtigungsfreiheit (d. h. insbesondere Vermeidung von Cybersickness) und der Zugänglichkeit (mit Ausnahme der berücksichtigten Sicherheitserfordernisse) wurde nicht aufrechterhalten, da sie themenübergreifend gleichermaßen bedeutsam sind. Besondere Anforderungen könnten sich jedoch je nach konkreter Ausgestaltung der Forschungsfrage ergeben (bspw. erwartbar gehäuftes Auftreten von Cybersickness bei Einbindung äl-

⁹ Siehe Berliner Mobilitätsgesetz der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (im Jahr 2021 erweitert um Fußverkehr). <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsplanung/fussverkehr/mobilitaetsgesetz/>

Hinreichende Eignung	Anforderungen
Autarkes oder laborgebundenes System (A, B)	Weder die visuelle Erlebnisqualität (FOV/Auflösung) noch die natürliche Fortbewegung sind essenzielle (wenn auch wünschenswerte) Anforderungen.
Autarkes System (A)	Die natürliche Fortbewegung bzw. die Ableitung realistischer gehbezogener Maße sind essenziell, ohne dass hohe Anforderungen an die visuelle Erlebnisqualität (FOV/Auflösung) gestellt werden.
Laborgebundenes System (B)	Ein hohes FOV oder eine realitätsnahe Auflösung sind essenziell, nicht aber die Möglichkeit zur natürlichen Fortbewegung
Laborgebundenes System mit natürlicher Fortbewegung (B [!])	Die Größe der begehbaren virtuellen Welt kann auf Raumgröße begrenzt werden, so dass eine natürliche Fortbewegung auf wenigen Metern möglich ist.
Nur High Fidelity-System (C)	Sowohl die visuelle Erlebnisqualität als auch die natürliche Fortbewegung sind unverzichtbar, und die Größe der virtuellen Welt lässt sich nicht auf Raumgröße beschränken.

Tab. 10: Beurteilung der hinreichenden Eignung der drei Systemvarianten in Abhängigkeit der definierten Anforderungen

terer VR-unerfahrener Probanden in lange, bewegungsreiche Szenarien mit vielen Kopfbewegungen).

Auf Basis der vorab erläuterten Kategorisierung wurde abschließend beurteilt, welche Systemvariante für das jeweilige Forschungsthema hinreichend geeignet ist, falls die High Fidelity-Variante, die beide zentrale Aspekte der Realitätsnähe vereint und für jedes dargestellte Forschungsthema prinzipiell geeignet ist, aus versuchsökonomischen Gründen nicht realisierbar ist. Die Beurteilung der hinreichenden Eignung der Systemvarianten erfolgte auf Basis der definierten Anforderungen nach dem in Tabelle 10 dargestellten Schema.

Die Forschungsthemen, die weder in der realen noch in der virtuellen Welt für einen experimentellen Ansatz geeignet sind, wurden nicht in die Themenübersicht aufgenommen. Dazu gehören insbesondere Themen, die eine Erfassung naturalistischen Verhaltens erfordern (bspw. die Erfassung der Häufigkeit und Umstände eigeninitiiertes Smartphone-Nutzung oder des Mobilitätsverhaltens in Bezug auf Anzahl und Länge der Wege oder der Verkehrsmittelwahl) oder die einer Beobachtung per se nicht zugänglich sind (bspw. Einstellungen oder Motive). Darüber hinaus wurden die Themen ausgeschlossen, die mit den skizzierten VR-Systemvarianten nicht realisierbar sind. Dies betrifft zum einen Themen, die eine Einbindung von mehreren Probanden in die virtuelle Welt und damit eine andere technische Umsetzung bzw. Erweiterung des VR-Systems erfordern, wie bspw. die Analyse natürlicher Interaktionen von Fußgängern untereinander oder die Analyse von Fußgängerströmen zu deren Lenkung in gewünschten Bahnen (bspw. zur Nutzung von Fußgängerüberwegen). Zum anderen wurden mit der Schulwegsicherheit assoziierte Themen ausgeschlossen, da die Nutzung von VR-Brillen durch jüngere Kinder noch als strittig gilt. Nach Aus-

sagen der Experten sind VR-Brillen herstellerseitig nicht für die Nutzung durch Kinder bis zwölf Jahre freigegeben. Grund dürfte hier die rechtliche Absicherung gegen etwaige Folgeschäden bei längerer und wiederholter Nutzung sein, die bei einem zeitlich begrenzten Forschungseinsatz nicht gegeben wäre. Doch lässt sich auf Basis der vorliegenden Projektergebnisse weder für noch gegen die herstellerseitige Altersempfehlung argumentieren.

Insgesamt verbleiben 22 zur Untersuchung in VR prinzipiell geeignete Forschungsthemen in der Übersicht. Die Forschungsthemen sind inhaltlich breit gefächert – von der Grundlagenforschung zur Wahrnehmung im Verkehr, über verschiedene Facetten der sicheren oder angenehmen Gestaltung der Verkehrsumwelt hin zu Aspekten der Interaktion, sei es mit anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern oder mit automatisierten Fahrzeugen. Auch Querungsszenarien sind aus verschiedenen Forschungsperspektiven heraus wiederholt vertreten. Die Forschungsthemen einschließlich der damit verbundenen Anforderungen an ein VR-System und die Ableitung des bzw. der hinreichend geeigneten VR-Systemvarianten zeigt Tabelle 11. Bei manchen Forschungsthemen lässt sich die Größe der zu beschreitenden virtuellen Welt auf Raumgröße begrenzen. Dabei handelt es sich um Querungssituationen, die aus unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten heraus betrachtet werden können. Damit bietet sich die Möglichkeit, auf eine vermittelte Fortbewegung zu verzichten und normales Gehen auch bei geringer Platzverfügbarkeit realisieren zu können. Gleichzeitig erfordert es jedoch einen hochgradig repetitiven Versuchsablauf, da Annäherungen an die Querungsstelle nicht abgebildet werden können. Ob dies einen gravierenden Nachteil darstellt oder zur Standardisierung des Ablaufs oder der Begrenzung der Versuchsdauer gar erwünscht ist, muss im Einzelfall entschieden werden.

Mit Blick auf die essenziellen Anforderungen an ein VR-System sticht insbesondere die visuelle Erlebnisqualität, insbesondere das große FOV, hervor. Die möglichst realistische Wahrnehmbarkeit von Informationen in der Sichtperipherie ist erforderlich, um natürliches Blickverhalten als solches interpretieren zu können (bspw. zur Intentionserkennung oder zur Beschreibung der visuellen oder akustischen¹⁰ Informationsaufnahme im Verkehrsraum). Wenn lediglich sichergestellt werden soll, dass bestimmte Informationen wahrgenommen werden, aber das wie und wann nicht bedeutsam ist, dann ist die Größe des FOV keine notwendige Anforderung an ein VR-System. Im Vergleich zum großen FOV ist eine möglichst realitätsnahe Auflösung eine vergleichsweise seltene Anforderung an ein System, die nur dann erforderlich ist, wenn die Lesbarkeit schriftlicher Informationen sichergestellt werden muss. Je nach Fragestellung lassen sich Einschränkungen bei der Auflösung vergleichsweise problemlos durch eine unrealistische Vergrößerung der Schrift auffangen, ohne dass die Validität der Aussage dadurch gefährdet wird (bspw. bei der Frage der Ablenkung durch Texten/Lesen von Nachrichten). Dies verbietet sich jedoch ab dem Zeitpunkt, ab dem die Salienz oder Lesbarkeit der jeweiligen Anzeigen Gegenstand der Untersuchung ist (bspw. Schilderererkennung bei Untersuchung der Wegführung).

Die Möglichkeit zur natürlichen Fortbewegung im VR-System wird als unverzichtbar eingestuft, sobald Indikatoren des Gehverhaltens als abhängige Variable erfasst werden und die geringere Realitätsnähe einer vermittelten Fortbewegung die Validität der Ergebnisse gefährden kann, oder falls etwaige Herausforderungen beim Gehen (bspw. bei Mobilitätseinschränkungen) nicht durch eine vermittelte Fortbewegung kaschiert werden dürfen. Insgesamt wird die Anforderung zur Ermöglichung einer natürlichen Fortbewegung seltener an ein VR-System gestellt als die Anforderung eines möglichst realistischen FOV. Davon abgesehen gilt jedoch themenübergreifend, dass die natürliche Fortbewegung ein wichtiger Bestandteil immersiven Erlebens der virtuellen Welt ist und – sofern realisierbar – auch ermöglicht werden sollte (vgl. Kapitel 6.3.1).

Manche Forschungsthemen stellen zusätzliche Trackinganforderungen (Hand-/Körper- oder Eye-Tracking) an das VR-System. Um Körperbewegungen

oder Gesten erfassen zu können, dürfte die laut Expertenbefragung präferierte einfache und kostengünstige Trackinglösung (am Körper befestigte Tracker, vgl. Kapitel 6.3.1), die Körperbewegungen mit nur geringfügigen Abweichungen nachbilden kann, vollauf genügen. Eine Erweiterung des VR-Systems durch zusätzliche Komponenten zum Handtracking wird dann erforderlich, wenn die Ablenkung durch Smartphones untersucht wird. Wege zur technischen Umsetzung der Smartphonennutzung in der virtuellen Welt sind in Kapitel 6.3.5 skizziert. Die Erfassung von Bedientätigkeiten (Texten o. ä.) kann entweder mittels eines in die VR-Brille integrierten Handtrackings (sofern verfügbar), einem Controller oder einem Datenhandschuh realisiert werden. Der Einsatz von Eye-Tracking erscheint bei verschiedenen Forschungsthemen zur Erfassung und Interpretation blickbezogener Maße erforderlich. Inwieweit andere Indikatoren für die Hin- bzw. Abwendung von Blicken oder die Erkennbarkeit von Informationen das Eye-Tracking ersetzen können (bspw. Kopfbewegungen, Head-down-Zeiten o. ä.) wird man in Abhängigkeit von der konkreten Fragestellung und unter Berücksichtigung der mit Eye-Tracking verbundenen Herausforderungen (s. Kapitel 6.3.3) entscheiden müssen.

Bei manchen Forschungsthemen stellen sich besondere Sicherheitserfordernisse, die gerade bei der Möglichkeit zum normalen Gehen entsprechend berücksichtigt werden müssen. Dies ist bspw. der Fall, wenn mobilitätsbeeinträchtigte Personen in die Studie eingebunden werden, Höhenunterschiede zu bewältigen (wie bspw. Attrappen von Bordsteinen oder Treppen) oder hohe Gehgeschwindigkeiten zu erwarten sind, die – selbst wenn nicht explizit instruiert – als implizite Anforderung des Szenarios (bspw. Evakuierung) gelesen werden. Gemäß den Erfahrungen im Expertenkreis ist die Wahrscheinlichkeit eines Sturzes – zumindest bei nicht hochaltrigen Probanden – äußerst gering, kann jedoch nicht mit Gewissheit ausgeschlossen werden.

Auf Basis der dargestellten Forschungsthemen und ihrer Anforderungen an ein VR-System lassen sich die Einsatzmöglichkeiten der beschriebenen Systemvarianten abschätzen. Demzufolge ist die High Fidelity-Variante, die beide essenziellen Anforderungen an die Realitätsnähe in sich vereint, prinzipiell für jedes Forschungsthema geeignet, aber nur in seltenen Fällen die einzig mögliche technische Um-

¹⁰ Zur Erfassung der Bedeutung akustischer Informationen zur Orientierung im Verkehr sollte der Sehsinn nicht durch ein reduziertes FOV künstlich beschnitten sein

setzung. In den meisten Fällen erscheint es akzeptabel, aus Gründen der Versuchsökonomie Abstriche bei der Realitätsnähe hinzunehmen und eine weniger aufwändige technische Umsetzung zu wählen. Hier erweist sich das laborgebundene System oftmals als eine hinreichend geeignete Alternative, zumal sie den Vorteil birgt, dass bei kleinen virtuellen Welten normales Gehen ermöglicht wird und folglich beide Kernanforderungen an die Realitätsnähe vereint werden können (s. Kapitel 6.3.1). Manche Forschungsthemen stellen weder an die visuelle Erlebnisqualität besondere Anforderungen noch erfordern sie zwingend eine natürliche Fortbewegung, so dass sowohl die autarke als auch die laborgebundene Variante als hinreichend geeignet erscheinen. Mit Blick auf die Aussagen der Experten, wann immer möglich eine natürliche Fortbewegung zu ermöglichen, wäre – sofern sich die Entscheidung im Einzelfall nicht auf Basis des Merk-

malsprofils erledigt (bspw. die Verfügbarkeit der dazu erforderlichen Fläche) – das autarke System vorzuziehen. Nur selten muss eine natürliche Fortbewegung realisiert werden, ohne dass hohe Anforderungen an FOV oder Auflösung gestellt werden. Auch in diesen Fällen bietet das autarke Systeme eine hinreichende Alternative gegenüber der aufwändigen High Fidelity-Variante, zumal sie über den Vorteil einer systeminhärenten Bewegungsfreiheit verfügt, die nicht über andere, ebenfalls mit Einschränkungen verbundene Mittel (bspw. Wireless Adapter sofern einsetzbar, Rucksacklösung) erst hergestellt werden muss.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die inhaltlich breite Übersicht über die Forschungsthemen eine Abschätzung der Bedeutsamkeit der Anforderungen an ein VR-System ermöglicht und damit die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen

Forschungsthemen		Kleine virtuelle Welt	Hohe visuelle Erlebnisqualität erforderlich	Hand-/Körpertracking erforderlich	Normales Gehen erforderlich	Besondere Sicherheitserfordernisse	Eye-Tracking als AV	System
Kommunikation/ Interaktion von Fußgängern und hochautomatisierten Fahrzeugen	Erkennung der Intention eines automatisierten Fahrzeugs, das explizit (bspw. durch Lichtsignale) oder implizit (bspw. Geschwindigkeitsanpassung) kommuniziert.	ja					ja	B [!]
	Erkennung der Intention eines Fußgängers aus natürlichem Fußgängerverhalten durch das automatisierte Fahrzeug		FOV	Körperbewegung	Gehverhalten und -geschwindigkeit			Nur C
	Interaktion (bspw. Aushandeln des Vorrangs) zwischen Fußgänger und automatisiertem Fahrzeug	ja		Körperbewegung oder Gesten				B [!]
Interaktion mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern (Radfahrer, E-Scooter)	Betrachtung des Geh- und Ausweichverhaltens in Abhängigkeit von umweltbezogenen Merkmalen bzw. Eigenschaften/Verhalten der virtuellen Interaktionspartner							A, B
Straßenüberquerung	Betrachtung des Querungsverhaltens an einer ausgewählten Querungsstelle in Abhängigkeiten von Variationen des Verkehrsumfeldes (Infrastruktur, Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer)	ja	FOV					B [!]
	Analyse des Querungsverhaltens entlang einer Strecke (Entscheidung zwischen mehreren Querungsmöglichkeiten)		FOV					B
Ablenkung durch Smartphone-Nutzung	Bewertung der Ablenkungswirkung in Hinblick auf sichere Verkehrsteilnahme			Handtracking für Bedieneingaben			ja	A, B
Visuelle Informationsaufnahme	Visuelle Orientierung im Verkehr/Gefahrenerkennung		FOV				ja	B
	Auswirkungen von Seheinschränkungen (bspw. Einbußen in Sehschärfe/Gesichtsfeld) auf die Wahrnehmung verkehrsrelevanter Informationen		FOV (Neglect)/ Auflösung (Sehschärfe)				ja	B

Tab. 11: Übersicht über die Forschungsthemen und die damit verbundenen Anforderungen

Forschungsthemen		Kleine virtuelle Welt	Hohe visuelle Erlebnisqualität erforderlich	Hand-/Körpertracking erforderlich	Normales Gehen erforderlich	Besondere Sicherheitsanforderungen	Eye-Tracking als AV	System
Akustische Informationsaufnahme	Nutzung akustischer Informationen im Verkehr (bzw. Auswirkungen durch deren Fehlen beim Musikhören/Hörschwächen)		FOV					B
	Gestaltung/Evaluation akustischer Signalgeber zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit elektrifizierter Fahrzeuge							A, B
Mobilitätseinschränkungen (Gehbeeinträchtigung)	Ermittlung der benötigten Querungszeiten bei Gehbeeinträchtigungen	ja			Gehgeschwindigkeit	ja		B [!]
	Barrierefreie Wegeketten vom Ein- bis Ausstieg an Bahnhöfen im ÖPNV				Mobilitätseinschränkung erhalten	ja		A
	Barrierefreie Ausgestaltung von Querungsmöglichkeiten	ja			Mobilitätseinschränkung erhalten	ja		B [!]
Verkehrspädagogik	Verhaltensänderung als Folge von Interventionsmaßnahmen (bzgl. Wissen, Motivation oder Risikobewertung)							A, B
Navigation/Wegfindung	Wegfindung im städtischen Bereich: Evaluierung/Gestaltung unterschiedlicher Entwürfe von Navigationsapps		Auflösung					B
	Wegführung/Schilderererkennung innerhalb von Gebäuden/Anlagen (bspw. Bahnhöfen, Flughäfen)		Auflösung					B
Evakuierung	Gestaltung/Evaluation der Signalisierung von Fluchtwegen (Erkennung/Befolgung)		FOV/Auflösung				ja	B
	Ermittlung der zur Evakuierung erforderlichen Zeit		FOV/Auflösung		Gehgeschwindigkeit	ja	ja	Nur C
Routenwahl	Einfluss verschiedener Merkmale der Verkehrsumwelt auf die Routenwahl							A, B
Erlebnisqualität der Verkehrsumwelt	Einfluss von Gestaltungsmaßnahmen (bspw. Verkehrsberuhigung, Begrünung, Verbreiterung der Wege) auf die Erlebnisqualität des Zufußgehens							A, B
	Einfluss der Beleuchtung von Fußwegen/Haltestellen auf das Sicherheitsgefühl							A, B

Tab. 11: Übersicht über die Forschungsthemen und die damit verbundenen Anforderungen (Fortsetzung)

technischen Umsetzungen verdeutlicht. Demzufolge ist die aus Gründen der Versuchsökonomie nur schwer realisierbare High Fidelity-Variante die themenübergreifend geeignetste Lösung, die jedoch in den meisten Fällen durch mindestens eine der beiden Systemvarianten ersetzt werden kann, wenn auch mit Einschränkungen in der Realitätsnähe (vgl. Kapitel 6.5). Das laborgebundene System erscheint insgesamt etwas vielfältiger einsetzbar als das autarke System, mit dem Vorteil, bei kleinen virtuellen Welten auch eine natürliche Fortbewegung zu ermöglichen. Dass jedoch das autarke System hinreichend geeignet ist, nicht aber das laborgebundene, tritt insgesamt nur selten auf. In vielen Fällen erweisen sich beide Varianten als zumindest

hinreichend geeignet, so dass mit Blick auf das Merkmalsprofil abgewogen werden muss. Dabei sollte die Bedeutung der natürlichen Gehbewegung, die das autarke System ermöglicht, nicht unterschätzt werden (s. Kapitel 6.3.1). Die Beurteilung der hinreichenden Eignung des laborgebundenen Systems mit vermittelter Gehbewegung ist keine Empfehlung zum Verzicht auf eine natürliche Fortbewegung, sondern das Resultat einer Abwägung zwischen konfligierenden Gütekriterien.

Die Darlegungen dieses Kapitels sollten mit der gebotenen Vorsicht interpretiert werden. So lässt sich nicht beurteilen, inwieweit die ausgewählten Forschungsthemen und die damit verbundenen Anforderungen einen repräsentativen Querschnitt durch

die Sicherheits- und Mobilitätsforschung von Fußgängern bieten. Zudem ist damit zu rechnen, dass mit der Konkretisierung der Fragestellung auch die Beurteilung der Anforderungen und damit auch die Systemeignung anders ausfallen kann. Daher sollten vor der Entscheidung über die technische Umsetzung die eigenen Anforderungen stets mit dem Merkmalsprofil des Systems (s. Kapitel 6.5) abgeglichen werden. Die vorliegende Übersicht und die daraus abgeleiteten Schlüsse sind daher lediglich als Einschätzung der relativen Bedeutsamkeit der Anforderungen und Systemvarianten auf einem hohen Abstraktionsgrad anzusehen. Nichtsdestotrotz bieten sie eine Hilfestellung zur Konkretisierung der offenen Punkte aus der Expertenbefragung, insbesondere bezüglich der Gewichtung der Anforderungen an eine VR-Brille.

6.5 Beschreibung und Bewertung der Systemvarianten

Im Folgenden sollen für die drei bisher nur in allgemeiner Form dargestellten VR-Systeme Empfehlungen zur Auswahl von VR-Komponenten gegeben werden.

6.5.1 Wahl der VR-Brille und der Fortbewegungstechnik

Die drei aus der Expertenbefragung abgeleiteten Systemvarianten können auf unterschiedliche Weise technisch umgesetzt werden. Insbesondere bei der Wahl der VR-Brille (für alle Systemvarianten) und der Fortbewegungstechnik (insbesondere für das laborgebundene System) wurden in der Expertenbefragung unterschiedliche Vorschläge unterbreitet. Auf Basis dieser Vorschläge sollen nachfolgend im Rahmen des Möglichen Empfehlungen zur Umsetzung ausgesprochen werden. Diese Empfehlung wurde mit Blick auf die Anforderungen, die sich aus experimentellen Verhaltensstudien generell bzw. aus deren Bedeutsamkeit für Themen der Sicherheits- und Mobilitätsforschung insbesondere (Kapitel 6.4) ergeben, getroffen und spiegelt die Sicht der Autoren wider.

Empfehlungen zur VR-Brille:

Angesichts der Anforderungen, die verschiedene Forschungsthemen an ein VR-System stellen, ist aus Sicht der Autoren ein möglichst realistisches FOV das bedeutsamste brillenbezogene Merkmal (s. Kapitel 6.4). Dieses Kriterium sollte daher bei der

Auswahl der VR-Brille gegenüber anderen in der Befragung genannten Kriterien (hochrealistische Auflösung/kabellose Nutzung mittels Wireless Adapter) priorisiert werden, solange diese noch nicht in einem Modell vereint sind. Sofern möglich sollte man sich zumindest die Option zur Erweiterbarkeit um ein Eye-Tracking-Modul offenhalten, um sich die Möglichkeit zur Ableitung von Blickbewegungsmaßen offenzuhalten.

Bei den autarken VR-Brillen fällt die Ableitung handlungsleitender Empfehlungen aus der Expertenbefragung schwer. Da das FOV bei allen autarken VR-Brillen noch sehr limitiert ist, erscheinen die bestehenden Unterschiede in der visuellen Erlebnisqualität nicht als zwingendes Auswahlkriterium. Ist die Erfassung von Blickbewegungen erforderlich, sind kaum Auswahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Modellen gegeben. Insgesamt sind die Empfehlungen der Expertenbefragung sehr modellspezifisch. Sie basieren auf den subjektiv erlebten Unterschieden bei der Bildqualität und der Trackingleistung sowie der Verbreitung (und damit der herstellerseitigen Unterstützung) der Modelle und können daher nicht in generische, aus den Spezifikationen der VR-Brille ablesbare, Empfehlungen übersetzt werden.

Da in ersten praktischen Erprobungen verschiedener autarker VR-Brillen die herstellerseitige Begrenzung der nutzbaren Bewegungsfläche nicht bzw. nicht ohne Mühe aufgehoben werden konnte, sollten jedoch die Angaben der Hersteller zur Größe dieser sogenannten Play Area bei der Wahl der autarken VR-Brille nicht unberücksichtigt bleiben. Dies gilt insbesondere dann, wenn noch keine Erfahrungsberichte zum gewünschten autarken Modell vorliegen, die deren Einsatztauglichkeit auch über die herstellerseitig benannte Play Area hinaus belegen.

Empfehlung zur vermittelten Fortbewegungstechnik beim laborgebundenen System:

Aus der Expertenbefragung geht klar hervor, dass eine natürliche Fortbewegung – normales Gehen, gegebenenfalls auch noch Redirected Walking – die beste Wahl ist. Alles andere sind Kompromisslösungen mit unterschiedlichen Merkmalsprofilen (s. Kapitel 6.3.1), die es gegeneinander abzuwägen gilt. Hier wurden im Rahmen der Expertenbefragung unterschiedliche Vorschläge unterbreitet. Vom Einsatz einer controllerbasierten Fortbewegung ist aus Sicht der Autoren aufgrund des ihm zugeschriebenen Merkmalprofils eher abzusehen, sofern sich

die Untersuchung nicht auf jüngere, computerspiel-erfahrenere Probanden beschränkt. Grund dafür ist die im Vergleich zu allen Alternativen höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Cybersickness sowie die aus Sicht der Autoren begründete (aber nicht belegte oder widerlegte) Annahme, dass ein Training vor dem Versuch die Unterschiede in der Vertrautheit mit dem Umgang nicht vollständig auffangen kann. Aus diesem Grund scheint eine Fortbewegungstechnik, die Schrittbewegungen nachahmt, altersübergreifend zugänglicher – wenn auch weit entfernt von einer natürlichen Fortbewegung. Dies gilt vereinzelt nach auch für hochpreisige Laufbänder, die im Rahmen der Befragung nicht als geeignete Fortbewegungsmöglichkeit vorgeschlagen wurden. Aus Sicht der Experten ist der Zugewinn an Natürlichkeit zu gering im Vergleich zu den damit verbundenen Nachteilen (Platzbedarf, fehlende Sicherungsmechanismen sowie Kosten im fünfstelligen Bereich).

Nichtsdestotrotz ermöglicht die motorische Ausführung einer Schrittbewegung immer noch eine ungefähre Ableitung gehbezogener Maße und verringert im Vergleich zum Einsatz eines Controllers die Wahrscheinlichkeit von Cybersickness. In der direkten Abwägung zwischen den genannten Möglichkeiten – Sensorschuhe versus Rundplattform – scheinen die Sensorschuhe den Erfahrungsberichten zufolge das bessere Kosten-Nutzenverhältnis (präziser in der Erfassung der Schrittbewegung, weniger einengend, günstiger) aufzuweisen. Gleichzeitig sind sie in Bezug auf Zugänglichkeit (in Bezug auf VR-Erfahrung, Alter, etc.) und der Verfügbarkeit gehbezogener Maße (Erfassung von Schrittbewegungen) dem Controller überlegen.

In den Fällen, in denen sich die begehbare virtuelle Welt auf wenige Meter begrenzen lässt, kann und sollte anstelle der vermittelten Fortbewegung normales Gehen ermöglicht werden. Dies setzt voraus, dass der Laborraum über eine frei begehbare, mittels Lighthouse-Stationen überwachte Fläche bzw. Schneise der erforderlichen Länge verfügt, und die Bewegungsfreiheit der Probanden gegeben ist. Sofern keine kabellose Nutzung möglich ist, erfolgt dies entweder mittels Kabelführung an der Decke (was die empfundene Bewegungsfreiheit immer noch stark einschränkt) oder über eine Rucksacklösung. Es bietet sich an, diese Möglichkeit bei der Wahl des Raums und beim Aufbau eines laborgebundenen Systems von vornherein mitzudenken.

Redirected Walking als (nicht gleichwertige) Alternative zum normalen Gehen:

Bei den beiden Systemvarianten, die normales Gehen ermöglichen, wird dann, wenn die Streckenführung durch die virtuelle Welt nicht auf die Begrenzungen des verfügbaren Raums zugeschnitten werden kann, auf die Technik des Redirected Walking ausgewichen. Diese Umsetzung ermöglicht – einen begehbaren Kreis mit einem Durchmesser von 20 m vorausgesetzt – ein unbegrenztes Geradeauslaufen in der virtuellen Welt, erfordert jedoch ein hohes Maß an Aufwand und Expertise zur Umsetzung. Das normale Gehen ist jedoch auch wegen der nicht künstlich beeinflussten Trajektorien und damit höheren Validität gehbezogener Maße nach wie vor die Methode erster Wahl.

6.5.2 Vergleichende Übersicht über die Systemvarianten

Auf Basis der vorangegangenen Erörterungen lassen sich die drei in Kapitel 6.3.2 abgeleiteten Systemvarianten wie in Tabelle 12 dargestellt gestalten.

Die nachfolgende Bewertung der drei Systemvarianten erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Expertenbefragung und greift viele der in Kapitel 6.3.1 erörterten Eigenschaften der VR-Komponenten auf. Eine Zusammenfassung dieser Bewertung zeigt Tabelle 13.

	Autarkes System	Laborgebundenes System	High Fidelity-System
VR-Brille	Autarke VR-Brille	Kabelgebundene VR-Brille mit großem FOV	Kabelgebundene VR-Brille mit großem FOV
Fortbewegung	Normales Gehen	Sensorschuhe	Normales Gehen
	Alternative: Redirected Walking	Alternativen: Rundplattform Normales Gehen (in kleinen virtuellen Welten)	Alternative: Redirected Walking
Tracking	Autark	Lighthouse-Stationen (ca. 4)	Lighthouse-Stationen (8 – max. 16)
Avatar	Simple kopfbundenes Modell	Modell basierend auf Kopf- und Schrittbewegungen	Tracker (je einen pro Handgelenk, Fußgelenk und Hüfte) samt inverser Kinematik

Tab. 12: Vorschläge zur technischen Umsetzung der drei Systemvarianten

	Autarkes System	Laborgebundenes VR-System	High Fidelity-System
Realitätsnähe	Visuelle Erlebnisqualität ggf. eingeschränkt*	Natürlichkeit der Fortbewegung eingeschränkt**	Hoch
Beeinträchtigungsfreiheit	Weitgehend	Cybersickness	Gewicht durch Rucksacklösung/ Wireless Adapter
Datenverfügbarkeit und -güte	Eingeschränkt	Hoch	Hoch
Breite Verwendbarkeit	Eingeschränkt durch reduziertes FOV	Eingeschränkt durch vermittelte Fortbewegung	Hoch
(Versuchs-)Ökonomie	Geringe Kosten für Systemanschaffung Ortsungebunden, setzt zumindest gelegentliche Verfügbarkeit eines hinreichend großen Raums voraus Hohe Expertise bei Umsetzung des Redirected Walking nötig	Geringer Platzbedarf Höhere Kosten für Systemanschaffung	Höhere Kosten für Systemanschaffung Hoher Platzbedarf Hohe Expertise bei Umsetzung des Redirected Walking nötig
(Daten-)Sicherheit	Etwaige Datenschutzproblematik behebbbar, ggf. Sturzsicherung erforderlich	Gegeben	Ggf. Sturzsicherung erforderlich
* Abhängig vom Anwendungsfall bedeutsam ** Mit Ausnahme sehr kleiner virtueller Welten			

Tab. 13: Vergleich der Systemvarianten nach den Dimensionen des Kriterienkatalogs

Das autarke VR-System nimmt Abstriche bei der Realitätsnähe der visuellen Darstellung hin, ermöglicht dafür aber auch auf größerem Raum eine natürliche Fortbewegung. Diese unvermittelte Bewegung in der virtuellen Welt reduziert die Wahrscheinlichkeit von Cybersickness, gerade wenn bei der technischen Umsetzung der virtuellen Erfahrung zusätzlich auf hohe Echtzeitnähe (d. h. geringe und konstante Latenzen) geachtet wird. Abgesehen von kaum vermeidbaren Unannehmlichkeiten gerade bei längerer Versuchsdauer (Schwitzen unter der VR-Brille, Gewicht am Kopf) oder einer individuell höheren Anfälligkeit für Cybersickness ist die Nutzung des VR-Systems daher weitgehend beeinträchtigungsfrei. Als autarkes System ist es weniger leistungsstark, so dass Probleme mit dem Prozessor abhängig vom Content (Größe und Detailreichtum der virtuellen Welt) denkbar sind. Die Akkuratheit des Trackings gilt als geringer als bei den kabelgebundenen Systemvarianten. Auch wenn die praktische Bedeutsamkeit dieser Abweichung umstritten ist, kann die Verwendung des Systems in Fällen, in denen ein exaktes Tracking zur Beantwortung der Fragestellung oder zur Sicherheit der Probanden erforderlich ist (z. B. wenn Stufen oder Bordsteine in der virtuellen Welt im Versuchsraum nachgebaut werden) nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Ansonsten ist die Verwendbarkeit des Systems vor allem durch das reduzierte FOV eingeschränkt, das für viele denkbare Forschungsthemen möglichst realistisch abgebildet werden sollte.

Dennoch gibt es kaum minder viele Fälle, für die das autarke System gut geeignet ist. Die größte Herausforderung stellt hierbei der Platzbedarf dar. Als ortsungebundenes System, das nicht auf externe, im Raum installierte Gerätschaften angewiesen ist, kann der Versuchsort nach Verfügbarkeit gewählt werden. Dennoch muss die für den Versuch erforderliche Größe des genutzten Raums ebenso gewährleistet sein wie die Abschirmung vor direkter Sonneneinstrahlung zur Gewährleistung des Trackings. Letzteres gilt für alle hier skizzierten Varianten (und alle den Autoren bekannten VR-Brillen). Ein Einsatz unter freiem Himmel ist daher – auch wenn es den Platzbedarf leichter erfüllen könnte – keine Option. Die erforderliche Raumgröße ist von der Wegführung durch die virtuelle Welt abhängig. Ein Einsatz des Redirected Walking ermöglicht eine unbegrenzte Bewegungsfreiheit durch die virtuelle Welt, setzt jedoch Aufwand und Expertise bei der Umsetzung sowie einen begehbaren Kreis mit einem Durchmesser von 20 m voraus. Dafür sind die Anschaffungskosten sehr gering, da außer der VR-Brille keine weiteren Gerätschaften erforderlich sind. Die mit dem Einsatz verbundenen Kosten (Versuchsraum, Personenmonate für Einrichtung und Betrieb, etc.) lassen sich an dieser Stelle nicht beziffern. Es sei nur ergänzt, dass die Bewertung der Bedienbarkeit für alle in der Expertenbefragung diskutierten VR-Systeme vergleichbar ausfiel und von den VR-Experten als leicht erlernbar und nicht zeitaufwändig eingestuft wurde.

Problematiken beim Datenschutz können modellabhängig auftreten, jedoch durch die Entscheidung für das gegebenenfalls teurere Modell für Geschäftskunden behoben werden. An und für sich birgt das VR-System keine inhärente Sicherheitsgefährdung. Da man Probanden jedoch zur Fortbewegung im Raum unter visueller Abschottung der Außenwelt anhält, sollten bei kritischen Szenarien (bspw. Stufenattrappen im realen Raum) oder vulnerablen Probanden zusätzliche Sicherungsmechanismen einbezogen werden, wie bspw. die Möglichkeit zum Festhalten an einem in der virtuellen Welt sichtbaren Gegenstand.

Das laborgebundene System bietet eine hohe Realitätsnähe in Hinsicht auf das annähernd realistische FOV auf kleinem Raum, was es mit erheblichen Einbußen bei der Natürlichkeit der Fortbewegung erkauft. Lediglich bei sehr kleinen virtuellen Welten (bspw. Querungsszenarien) lässt sich bei einer hinreichend großen begehbaren und überwachten Fläche bzw. Diagonale beides vereinen. Bei der vermittelten Fortbewegung ist hier eher mit dem Auftreten von Cybersickness zu rechnen als bei den beiden anderen Systemvarianten, insbesondere da die hier präferierte VR-Brille ein besonders großes FOV aufweist (s. Kapitel 2.5). Als kabelgebundenes System, das auf das Lighthouse-Tracking zurückgreift, bietet es eine hohe Genauigkeit im Tracking, und ist bei einer größeren Anzahl an Lighthouse-Stationen auch weniger anfällig für etwaige Verdeckungen.

Damit die mit der VR-Brille mögliche Bildqualität ausgeschöpft und eine stabile Anwendung gewährleistet werden kann, muss sie an einen leistungsfähigen Rechner mit einer hochwertigen Grafikkarte angeschlossen werden. Pauschale Empfehlungen zur erforderlichen Hardware (CPU, Arbeitsspeicher und Grafikkarte) sind jedoch nicht möglich. Die Auswahl dieser Hardwarekomponenten muss unter Berücksichtigung der Herstellerangaben und der Erfordernisse der intendierten Anwendung erfolgen. Die hohen Hardwareanforderungen sind ein weiterer Grund dafür, dass die Anschaffungskosten deutlich höher ausfallen als beim autarken System. Der große Vorteil dieses Systems gegenüber den beiden anderen ist der geringe Platzbedarf. So genügt ein vor Sonneneinstrahlung abschirmbarer Raum normaler Größe, der mit den Lighthouse-Stationen zum Tracking ausgestattet wird. Möchte man sich die Option, in kleinen virtuellen Welten normales Gehen zu ermöglichen, offenhalten, sollte die verfügbare Raumdiagonale bei der Wahl des Ver-

suchsraums ebenso bedacht werden wie die Sicherung der weitgehenden Bewegungsfreiheit (Kabelschienen an der Decke, besser jedoch die kabellose Nutzung mittels Wireless Adapter, falls verfügbar, oder eine Rucksacklösung). Die Verwendbarkeit des Systems hängt entscheidend davon ab, ob man auf eine natürliche Fortbewegung in größeren Welten angewiesen ist oder nicht. Zwingend erforderlich ist dies nur in wenigen Fällen, wenn auch für die Realitätsnähe der virtuellen Erfahrung immer hochgradig erwünscht. Datenschutzproblematiken bei den vorgeschlagenen Komponenten für das Laborsystem sind keine bekannt, können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Durch die Nutzung im Sitzen bei Verwendung der Sensorschuhe (bzw. durch den Sicherheitsbügel bei Entscheidung für eine Rundplattform) ist das VR-System auch bei Probanden mit besonderer Vulnerabilität gefahrlos verwendbar.

Das High Fidelity-System verbindet eine hohe visuelle Erlebnisqualität (u.a. durch das FOV) mit einer natürlichen Fortbewegung. Dies ermöglicht eine hohe Realitätsnähe, sofern auch die Gestaltung der virtuellen Welt und die Softwareumgebung darauf abgestimmt sind. Durch die natürliche Fortbewegung ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Cybersickness, eine hohe und konstante Echtzeitnähe vorausgesetzt, gering, aber bei individueller Anfälligkeit auch hier nicht auszuschließen. Der möglicherweise begünstigende Einfluss des großen FOV der VR-Brille auf das Auftreten von Cybersickness dürfte durch die natürliche Fortbewegung aufgehoben oder zumindest deutlich abgeschwächt werden. Als beeinträchtigendes Element bleibt das, was die vergleichsweise schwerwiegendere Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit durch die kabelgebundene VR-Brille aufhebt: das Gewicht des Wireless Adapters (sofern verfügbar) bzw. des Rucksacks. Wie das laborgebundene System ermöglicht es eine hohe Trackinggenauigkeit und eine stabile Anwendung, sofern – wie beim laborgebundenen System – ein leistungsfähiger Rechner samt Grafikkarte zur Verfügung steht. Durch die Erfüllung beider zentraler Anforderungen an die Realitätsnähe – die visuelle Erlebnisqualität und die natürliche Fortbewegung, ist dieses System im Gegensatz zu den beiden anderen Varianten breit einsetzbar.

Kosten und Aufwand sind jedoch nicht unerheblich. Da ein größerer Raum abgedeckt werden muss, ist eine höhere Anzahl an Lighthouse-Stationen für ein verlässliches Tracking erforderlich ist. Dabei stellt das High Fidelity-System dieselben hohen Anforde-

rungen wie das autarke System an die Größe des verfügbaren Raumes bzw. an Aufwand und Expertise bei Umsetzung des Redirected Walking, jedoch ohne die Freiheit der ortsungebundenen Nutzung. Die Anschaffungskosten liegen durch die zusätzlich erforderlichen Trackingkomponenten noch etwas höher als beim laborgebundenen System. Die hohe erforderliche Performanz geht auf Kosten der Laufzeit, so dass bei einem mobilen Einsatz des Systems mittels Rucksacklösung der Einsatz von Ersatzakkus (Möglichkeit zum Akkutausch im laufenden Betrieb gegeben) entsprechend eingeplant werden muss. Datenschutzproblematiken sind keine bekannt, können jedoch wiederum nicht ausgeschlossen werden. Wie beim autarken System sollten bei kritischen Szenarien (bspw. Stufenattrappen im realen Raum) oder vulnerablen Probanden zusätzliche Sicherungsmechanismen eingezogen werden, wie bspw. die Möglichkeit zum Festhalten an einem in der virtuellen Welt sichtbaren Gegenstand.

7 Fazit

VR-Brillen werden seit mehreren Jahren auch zur Untersuchung von Fußgängerverhalten eingesetzt. Studien heben die dadurch erzielte Realitätsnähe bzw. Präsenz und die auch bei älteren Probanden geringe Cybersickness hervor (DEB et al., 2017; DORIC et al., 2016; FELDSTEIN et al., 2016; PALA et al., 2021). Die prinzipielle Eignung von VR-Brillen für den Einsatz in verhaltenswissenschaftlichen Experimentalstudien scheint gegeben. Die bislang durchgeführten VR-Fußgängerstudien (v. a. Querungsszenarien) ermöglichen zumeist eine natürliche Fortbewegung, beschränken jedoch den Bewegungsraum der Probanden durch die virtuelle Welt auf wenige Schritte (s. Kapitel 4.2). Daher bleibt offen, ob die bislang eingesetzten VR-Systeme prinzipiell auch zur Untersuchung anderer Forschungsszenarien geeignet sind. Das vorliegende Projekt bietet eine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten von VR-Systemen und die Anforderungen, die sie als Forschungsinstrument erfüllen müssen. Die Kernergebnisse dieses Projekts sind

- 1) ein Kriterienkatalog zur Definition der Anforderungen an ein VR-System zur Untersuchung von Fußgängerverhalten,
- 2) die allgemeine Beschreibung geeigneter VR-Systeme auf Grundlage dieses Kriterienkatalogs im Rahmen einer Expertenbefragung und

- 3) die Bewertung dieser VR-Systeme für den Einsatz in der Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung.

Kriterienkatalog:

Der im vorliegenden Projekt entwickelte Kriterienkatalog definiert die Anforderungen an für verhaltenswissenschaftliche Studien valide und ökonomisch einsetzbare VR-Systeme. Im vorliegenden Projekt gab er die Leitlinien für die Auswahl geeigneter VR-Systeme und die Beschreibung ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile durch die VR-Experten vor. Diese Vor- und Nachteile fallen in Abhängigkeit von den zu untersuchenden Fragestellungen und den daraus resultierenden Anforderungen (bspw. großes FOV oder natürliche Fortbewegung) unterschiedlich stark ins Gewicht. In Kombination mit dem jeweiligen Anforderungsprofil der interessierenden Forschungsfrage(n) kann der Kriterienkatalog die Entscheidung zwischen den hier beschriebenen Systemvarianten leiten. Darüber hinaus kann der Kriterienkatalog auch zukünftig eine Unterstützung bei der Identifikation geeigneter VR-Systeme bieten, indem die Merkmale technischer Neuentwicklungen an den darin definierten Anforderungen gespiegelt werden. Somit wird davon ausgegangen, dass sich der Kriterienkatalog trotz der schnellen Entwicklungszyklen im Bereich VR auch mittelfristig als Entscheidungshilfe bei der Auswahl von VR-Komponenten wird anwenden lassen.

Beschreibung der als geeignet erachteten VR-Systeme:

In den durchgeführten Interviews sprachen die Experten unterschiedliche Empfehlungen für das zur Untersuchung von Fußgängerverhalten bestmöglich geeignete VR-System aus. Grund für diese Unterschiede war die jeweils unterschiedliche Gewichtung der damit verbundenen Vor- und Nachteile durch die Experten, während sie in der Beschreibung dieser Vor- und Nachteile sowohl untereinander als auch mit den Erkenntnissen der Fachliteratur übereinstimmten. Aus den Interviews gingen drei Systemvarianten mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen hervor:

- 1) ein autarkes, ortsungebunden einsetzbares und kostengünstiges System mit Einschränkungen in der visuellen Erlebnisqualität,
- 2) ein laborgebundenes System mit hoher visueller Erlebnisqualität bei geringem Platzbedarf aufgrund der vermittelten Fortbewegung, und

- 3) ein High Fidelity-System, das die Anforderungen an eine hohe visuelle Erlebnisqualität und eine natürliche Fortbewegung vereint, aber aus versuchsökonomischen Gründen nicht leicht umzusetzen ist.

Für die konkrete Ausgestaltung der drei Systemvarianten (Wahl der VR-Brille, etc.) wurden ebenfalls unterschiedliche Vorschläge unterbreitet. Die aus diesen Vorschlägen abgeleiteten Empfehlungen zur VR-Brille (bei Systemvariante 2 und 3) und zur Fortbewegungstechnik (bei Systemvariante 2) erfolgte mit Blick auf die im Jahr 2021 verfügbaren Modelle unter besonderer Gewichtung folgender für ein Forschungsinstrument in der Sicherheits- und Mobilitätsforschung bedeutsamer Anforderungen:

- 1) einem möglichst realistischen FOV (bei beiden kabelgebundenen Systemvarianten),
- 2) einer vermittelten Fortbewegungstechnik (bei dem laborgebundenen System), die für jüngere wie ältere konsolenerfahrene Nutzer gleichermaßen zugänglich erscheint und damit die Untersuchung von Alterseffekten nicht durch Methodenartefakte zu überlagern droht.

Die Auswahl dieser Anforderungen spiegeln deren Bedeutsamkeit für die angedachten Anwendungsfälle aus Sicht der Autoren wider. Gemäß der im Projekt durchgeführten Expertenbefragung ist die Fortbewegung mittels Controller eine mögliche Alternative (wenn auch aus Sicht der Autoren vor allem für Untersuchungen mit ausschließlich jüngeren Probanden). Auch ist die Entscheidung für eine VR-Brille mit einem anderen Merkmalsprofil anzuraten, wenn diese die aus der interessierenden Fragestellung resultierenden Anforderungen besser erfüllt.

Die drei Systemvarianten können zudem um zusätzliche Funktionen erweitert werden, um die Anforderungen spezieller Forschungsfragen zu erfüllen. Beispielsweise wird eine Ergänzung um ein Handtracking (mittels Controller, Datenhandschuh, etc.) erforderlich, um die Ablenkung von Fußgängern durch Smartphonennutzung untersuchen zu können (für Möglichkeiten zur technischen Umsetzung s. Kapitel 6.3.5). Aber auch unabhängig von der Ergänzung um zwingend erforderliche Funktionen verspricht eine Anreicherung des virtuellen Erlebens und Verhaltens eine immersivere Erfahrung. Empfohlen werden diesbezüglich beispielsweise Möglichkeiten zur direkten Interaktion mit der Umgebung (FELDSTEIN et al., 2016) oder die Einbin-

dung räumlicher akustischer Hinweisreize (DORIC et al., 2016; SCHNEIDER et al., 2018).

Einsatz der VR-Systeme in der Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung:

Alle drei im Projekt beschriebenen Systemvarianten (s.o.) gelten aus Expertensicht als für den Forschungseinsatz geeignet. Das High Fidelity-System sticht dadurch hervor, dass es eine hohe visuelle Realitätsnähe mit einer natürlichen Fortbewegung verbindet und damit die für viele Fragestellungen wünschenswerten oder gar erforderlichen Anforderungen erfüllt. Doch auch die beiden anderen Systemvarianten können für bestimmte Forschungsthemen hinreichend geeignet, aber deutlich einfacher und kostengünstiger umzusetzen sein. Aus diesem Grund lässt sich keine pauschale Empfehlung für eine bestimmte Systemvariante aussprechen. Die schlussendliche Entscheidung hängt von der zu untersuchenden Fragestellung und den daraus resultierenden Anforderungen sowie den eigenen Umsetzungsmöglichkeiten ab. Bei der Entscheidung zwischen den vorliegenden Varianten bietet die im vorliegenden Projekt erarbeitete Übersicht über Forschungsthemen der Verkehrssicherheits- und Mobilitätsforschung (bspw. zur Erforschung der Wahrnehmung im Verkehr, der sicheren/komfortablen/barrierefreien Gestaltung der Verkehrsumwelt, der Interaktion mit ungeschützten und motorisierten Verkehrsteilnehmern, etc.) und die daraus resultierenden Anforderungen an ein VR-System (Notwendigkeit einer natürlichen Fortbewegung, großes FOV, etc.) einen guten Ausgangspunkt für die anwendungsfallbezogene Entscheidung.

Aus der Literaturübersicht und den Expertenbefragungen lassen sich konkrete anwendungsbezogene Empfehlungen ableiten, die bei der Durchführung von Experimentalstudien berücksichtigt werden müssen. So ist eine Gewöhnung an das VR-System unerlässlich, um anfängliche Probleme mit Desorientierung und Balance zu beheben (DORIC et al., 2016) und sich mit der Bewegung durch die virtuelle Welt vertraut zu machen. Abstrakte Fortbewegungstechniken (wie bspw. die Bedienung von Controllern) müssen mitunter erst erlernt werden. Durch Absolvieren entsprechender Trainingsszenarien können Probanden schrittweise an die virtuelle Welt und ihre jeweiligen Aufgaben herangeführt werden. Dem Auftreten von Stürzen beim Gehen auf bewegtem Untergrund (bspw. Laufbändern) oder bei älteren Probanden mit Gleichgewichtsstö-

rungen kann jedoch durch Eingewöhnung alleine nicht hinreichend begegnet werden. Daher muss gegebenenfalls auf andere Sicherungsmechanismen (Sicherungsgurte, Haltemöglichkeiten, etc.) zurückgegriffen werden. Eine weitere Gefahrenquelle – auch aus Sicht der Probanden – ist der durch die visuelle Abschottung von der realen Welt nicht mit hinreichender Sicherheit vermeidbare Aufprall auf Wände oder Gerätschaften des Versuchsraums. Die alleinige Visualisierung der Grenzen der verfügbaren Bewegungsfläche durch eine in der virtuellen Welt eingeblendete Barriere wird von Probanden nicht als hinreichend sicher empfunden bzw. muss gegebenenfalls ausgeschaltet werden, um sich in einem größeren Areal bewegen zu können. Ein möglicher Lösungsansatz wäre daher, auf einen hinreichenden Abstand zwischen der begehbaren Fläche und den physischen Raumgrenzen zu achten, oder bei begrenztem Platz andere Sicherheitsmechanismen zu erwägen (PALA et al., 2021). Art und Notwendigkeit dieser Sicherungsmechanismen sind abhängig von der gewählten Fortbewegung (Laufband oder normales Gehen?), den Eigenschaften des Raums (Hindernisse, Begrenzungen?) oder der VR-Brille (Wechsel zu Pass-through-Modus bei Verlassen des vorab definierten Bewegungsbereichs möglich?).

In der Literatur wird zudem die Bedeutung der virtuellen Verkörperung betont, um Probanden besser in der virtuellen Welt zu verankern und Präsenz (bspw. auch ein realistischeres Risikoempfinden) und Aufgabenleistung (bspw. Entfernungseinschätzung) zu unterstützen (MALLARO et al., 2017; SCHNEIDER et al., 2018; SLATER et al., 2010). Möglichkeiten zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen der Expertenbefragung aufgezeigt. Nicht adressiert wurde hingegen die Frage zu den empfohlenen phänotypischen Merkmalen des jeweiligen Avatars (menschähnlich oder abstrakt? Standardisiert oder individualisiert – in Alter, Geschlecht oder Körpergröße?). Wie in der Literaturübersicht dargestellt, können Augenhöhe oder Armlänge die Entfernungseinschätzung in virtuellen Welten, die auch in Bezug zum eigenen (virtuellen) Körper erfolgt, beeinflussen (LEYRER et al., 2011; LINKENAUER et al., 2013, vgl. Kapitel 2.3). Auch wirkt die konkrete Ausgestaltung des Avatars auch auf das Selbstbild der Probanden (BANAKOU et al., 2013). Auf Basis dieser Befunde lässt sich die Bedeutung dieser Gestaltungsentscheidungen für das Erleben und Verhalten in virtuellen Welten aufzeigen, ohne an dieser

Stelle eine allgemeingültige Empfehlung aussprechen zu können.

Grenzen des Projekts:

Im Rahmen des Projekts konnten nicht alle Aspekte von VR-Systemen in vergleichbarem Umfang adressiert werden. Der hier vorgestellte Kriterienkatalog ist daher explizit auf VR-Systeme zur Untersuchung von Fußgängerverhalten ausgerichtet. Dies gilt auch für die auf Basis des Kriterienkatalogs entwickelten Systemvarianten und die Beurteilung ihrer Einsatzmöglichkeiten.

Bei der Beschreibung der Systemvarianten lag der Fokus des vorliegenden Projekts auf den erforderlichen Hardwarekomponenten. Die softwareseitige Umsetzung eines VR-Systems – nicht minder wichtig, um die skizzierten Systemvarianten in eigens gestalteten Forschungsszenarien einsetzen zu können – sowie die Umsetzungen von VR-Systemen für andere verkehrsbezogene Forschungsbereiche (bspw. im Pkw-, Motorrad- oder Fahrradsimulator) konnten nicht vertiefend behandelt werden. Die im Kriterienkatalog definierten Anforderungen an ein VR-System zur Untersuchung von Fußgängerverhalten sind nicht uneingeschränkt auf VR-Systeme zur Untersuchung anderer Verkehrsteilnahmearten übertragbar, die sich in mindestens einem wesentlichen Punkt vom Anwendungsfall des Fußgängers unterscheiden. Durch die per se vermittelte Fortbewegung – per Fahrrad, Motorrad oder Pkw – entfallen viele Herausforderungen, die mit einer natürlichen Fortbewegung durch den Raum verbunden sind (hoher Platzbedarf, verlässliches Tracking auch auf großem Raum, Bewegungsfreiheit ohne störendes Kabel). Damit entfallen gleichzeitig die zentralen Vorteile einer autarken VR-Brille. Im Einklang mit diesem Anforderungsprofil wäre daher zur Untersuchung vermittelter Fortbewegungsarten wohl eine kabelgebundene VR-Brille vorzuziehen, welche die jeweiligen Anforderungen des interessierenden Anwendungsfalls (z. B. annäherungsweise realistisches FOV, hochrealistisches Auflösungsvermögen, etc.) bestmöglich erfüllt.

Einige Ergebnisse des vorliegenden Projekts unterliegen einem gewissen Zeitbezug. Möglicherweise werden mittelfristig auch die Unterschiede zwischen den drei (noch) distinkten Systemvarianten verschwimmen, wie es die im anschließenden Ausblick (Kapitel 8) beschriebenen prognostizierten technischen Entwicklungen nahelegen.

8 Ausblick

Im vorliegenden Projekt wurden mehrere VR-Systemvarianten zur Untersuchung von Fußgängerverhalten beschrieben. Gegenüber der Versuchsdurchführung im realen Straßenverkehr bieten sie die Möglichkeit zur gezielten Variation interessierender Einflussgrößen, zur Kontrolle von Störfaktoren und zur Gewährleistung der Sicherheit der Probanden. Als Forschungsinstrument ist ihr Anspruch eine möglichst hohe Entsprechung zum Erleben und Verhalten in der realen Welt, um aus den in virtuellen Welten erzeugten Daten valide Schlüsse auf das reale Verkehrsverhalten ziehen zu können. Aus Expertensicht sind die im Bericht vorgestellten Systemvarianten prinzipiell dazu geeignet. Allerdings konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht abschließend geklärt werden, inwieweit sich die hier beschriebenen Systemvarianten hinsichtlich der Erzeugung valider Verhaltensmaße voneinander sowie im Vergleich zur realen Welt unterscheiden. Bislang ist nach Wissen der Autoren noch nicht systematisch untersucht worden, wie sich die Wahl einer vermittelten Fortbewegungstechnik – bspw. mittels der genannten Sensorschuhe – auf die Validität verhaltensbezogener Maße auswirkt. Ebenso wenig lässt sich beurteilen, wie valide sich Maße der visuellen Orientierung im Verkehr mit einer VR-Brille mit den hier gewählten Spezifikationen erfassen lassen. Wie groß und bedeutsam die Diskrepanz artifizierter Fortbewegungstechniken zum normalen Gehen – in der virtuellen und realen Welt – oder der Einfluss der Größe des FOV auf die Validität verhaltensbezogener Maße ausfällt, gilt es daher noch zu untersuchen. Ersten Erkenntnissen zufolge weist das Verhalten in der virtuellen Welt zwar große Ähnlichkeit mit dem Verhalten in der realen Welt auf, ist aber nicht identisch. Die von FELDSTEIN & DYSZAK (2020) in einem realen Querungsszenario und seinem virtuellen Nachbau erfassten abhängigen Variablen unterscheiden sich noch in ihrer absoluten Höhe. Aus diesem Grund können und sollen die derzeitig realisierbaren VR-Systeme Realverkehrsstudien nicht ersetzen, sondern eine Alternative gegenüber bisherigen Simulationsansätzen bieten. Die grundsätzliche Abwägung zwischen den Vorteilen virtueller Welten (Ausschluss von Störfaktoren, Sicherheit, Untersuchung des Einflusses neuartiger Technologien) und der ökologischen Validität von Realverkehrsstudien bleibt weiterhin erforderlich. Doch mag der Einsatz von VR-Brillen dazu beitragen, die Entscheidung für die virtuelle Welt aufgrund des höheren Präsenzer-

lebens bei VR-Brillen im Vergleich zu klassischen Simulationsansätzen (wie bspw. aufwändigen CAVEs) zu erleichtern (PALA et al., 2021).

Angesichts der schnellen Entwicklungszyklen ist der Markt für VR-Komponenten hochdynamisch, was zu einer hohen Anzahl neuer Produkte und Produktverbesserungen führt. Um in etwa abschätzen zu können, wie sich die zukünftigen Entwicklungen auf die vorliegenden Ergebnisse auswirken, wurde im Rahmen der Expertenbefragung nach den erwartbaren technischen Entwicklungen der kommenden zwei bis drei Jahre gefragt. Den Prognosen zufolge ist mit einer starken Verbreitung von VR zu rechnen, insbesondere im industriellen Bereich, aber auch im Bereich Social VR (d. h. bei Plattformen für virtuelle Treffen). Disruptive Veränderungen, wie zuletzt das Aufkommen der autarken VR-Brillen, werden jedoch nicht erwartet. Stattdessen ist mit steten Verbesserungen der visuellen Erlebnisqualität (Displays, FOV, Auflösung) und des brillenbasierten Handtrackings zu rechnen. Vor allem aber wird man daran arbeiten, eine möglichst einfache und komfortable Nutzung zu ermöglichen. Die Komponenten werden kleiner, leichter und benutzerfreundlicher, die Akkulaufzeit länger. Hersteller legen den Fokus daher verstärkt auf die Entwicklung autarker VR-Brillen.

Die Nutzungserfahrung soll möglichst ungestört und ohne unnötige Unterbrechungen ablaufen. Bei der privaten Nutzung werden VR-Brillen häufig abgesetzt, weil sie die Umgebung visuell abschotten oder durch die Verdeckung des Gesichts die Kommunikation erschweren. Um dem zu begegnen, wird an der stärkeren Verschmelzung von realer und virtueller Welt gearbeitet. Dazu gehört ein schneller(er) Wechsel zwischen VR und Pass-through-Modus oder ein intensivierter Einsatz von Interaktionsmöglichkeiten (bspw. Eye-Tracking zum Blickkontakt zwischen Avataren oder eine Umgestaltung bislang verwendeter Controller zu Handschuhen). Man wird den realen Raum erkennen und dessen Grenzen in der virtuellen Welt berücksichtigen können. Anvisiert ist auch die Möglichkeit zum schnellen und spontanen Wechsel vom Smartphone auf die VR-Brille für private oder berufliche Interaktionen. Darüber hinaus wird die Verbesserung der Einsatzfähigkeit von Augmented Reality (AR)-Anwendungen (d. h. der Erweiterung der realen Welt um virtuelle Darstellungen) als ein Schwerpunktthema erachtet. Noch beeinträchtigt der Lichteinfall die Wahrnehmbarkeit der eingeblendeten Inhalte. Wird diese herausfordernde Problematik gelöst, wäre

auch ein Forschungseinsatz im Außenbereich denkbar.

Die vorliegenden Prognosen versprechen eine höhere Leistungsfähigkeit und eine einfachere und komfortablere Nutzung. Die technischen Weiterentwicklungen dürften dazu beitragen, den Zukauf externer Gerätschaften zum Hand- oder Eye-Tracking zunehmend obsolet zu machen. Mit der verstärkten Ausrichtung auf autarke VR-Brillen wird sich voraussichtlich in absehbarer Zeit auch ein autarkes VR-System realisieren lassen, das eine höhere visuelle Erlebnisqualität verspricht. Die dadurch gewonnene Realitätsnähe würde die Einsatzmöglichkeiten des VR-Systems verbessern und die Kosten-Nutzen-Bilanz von der hier beschriebenen kostenintensiven und raumgebundenen High Fidelity-Variante zugunsten des kostengünstigen und raumgebundenen autarken VR-Systems verschieben. Inwieweit die angekündigten Funktionen auch verfügbar und hinreichend exakt sein werden, lässt sich derzeit nicht beurteilen. Vieles deutet jedoch auf eine zunehmende Vereinbarkeit der Anforderungen hin, die bislang noch gegeneinander abgewogen werden mussten. Angesichts dieser Entwicklungen ist mit einer zunehmenden Verbreitung und Nutzung von VR-Systemen auch in der Verhaltensforschung zu rechnen.

Der Verweis auf den Bereich der AR lenkt den Blick auf ein spannendes Forschungsgebiet, das ebenfalls großes Potenzial zum Einsatz in der verkehrsbezogenen Forschung vermuten lässt, sobald die Möglichkeit zum verlässlichen Außeneinsatz gegeben ist. Die Potenziale dieses Ansatzes müssten jedoch auch in Hinblick auf den Zusatznutzen gegenüber den beiden etablierte(re)n Alternativen – Studien in ausschließlich realen oder gänzlich virtuellen Welten (mittels VR-Brille oder projektionsbasierten Ansätzen) – beurteilt werden.

Literatur

- ADAMS E., & ROLLINGS A. (2006). *Fundamentals of game design*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, Upper Saddle.
- ANCIAES, P., JONES, P. (2020). Transport policy for liveability – valuing the impacts on movement, place, and society. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 132, 157-173.
- ANDONIAN, B., RAUCH, W., & BHISE, V. (2003). Driver steering performance using joystick vs. steering wheel controls. *SAE transactions*, 1-12.
- ARPPE, D. F., ZAMAN, L., PAZZI, R. W., & EL-KHATIB, K. (2020). UniNet: A mixed reality driving simulator. In *Proceedings Graphics Interface Conference 2020* (pp. 37-55). University of Toronto. <https://doi.org/10.20380/GI2020.06>
- ARSENAULT, D. (2005). Dark waters: Spotlight on immersion. In *Proceedings of the Game-On North-America Conference* (pp. 50-52). Eurosis, Ghent, Belgium.
- BANAKOU, D., GROTEN, R., & SLATER, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12846–12851. <https://doi.org/10.1073/pnas.1306779110>
- BEST, S. (1996). Perceptual and oculomotor implications of interpupillary distance settings on a head-mounted virtual display. In *Proceedings of the IEEE 1996 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1996* (Vol. 1, pp. 429-434). IEEE.
- BIOCCA, F. (1997). The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>
- BLISSING, B. & BRUZELIUS, F. (2018). Exploring the suitability of virtual reality for driving simulation. In *Driving Simulation Conference 2018* (pp. 163-166).
- BÖCKLE, M.-P., KLINGEGARD, M., HABIBOVIC, A., & BOUT, M. (2017). SAV2P - Exploring the

- impact of an interface for shared automated vehicles on pedestrians' experience. In *AutomotiveUI 2017: Proceedings of the 9th international Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct* (pp. 136–140). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131765>
- BOLETISIS, C. & CEDERGREN, J.E. (2019). "VR Locomotion in the New Era of Virtual Reality: An Empirical Comparison of Prevalent Techniques". *Advances in Human-Computer Interaction*, Article ID 7420781. <https://doi.org/10.1155/2019/7420781>
- BORREGO, A., LATORRE, J., ALCAÑIZ, M., & LLORENS, R. (2019). Embodiment and Presence in Virtual Reality after Stroke. A Comparative Study with Healthy Subjects. *Frontiers in Neurology*, 10, 1061. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.01061>
- BOS, J. E., BLES, W., & GROEN, E. L. (2008). A theory on visually induced motion sickness. *Displays*, 29(2), 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.002>
- BRANDT, T., DICHGANS, J., & KOENIG, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, 16(5), 476–491. <https://doi.org/10.1007/BF00234474>
- BROOKS, J. O., GOODENOUGH, R. R., CRISLER, M. C., KLEIN, N. D., ALLEY, R. L., KOON, B. L., et al. (2010). Simulator sickness during driving simulation studies. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 788–796. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.04.013>
- CAMARA, F., DICKINSON, P., MERAT, N., & FOX, C. W. (2020). Examining Pedestrian-Autonomous Vehicle Interactions in Virtual Reality. In *Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020*. Transport Research Arena.
- CAMPOS, J. L., BUTLER, J. S., & BÜLTHOFF, H. H. (2012). Multisensory integration in the estimation of walked distances. *Experimental Brain Research*, 218(4), 551–565. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3048-1>
- CAVALLO, V., & LAURENT, M. (1988). Visual Information and Skill Level in Time-To-Collision Estimation. *Perception*, 17(5), 623–632. <https://doi.org/10.1068/p170623>
- CHANG, E., KIM, H. T., & YOO, B. (2020). Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(17), 1658–1682. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>
- CREEM-REGEHR, S. H., STEFANUCCI, J. K., THOMPSON, W. B., NASH, N., & MCCARDELL, M. (2015). Egocentric Distance Perception in the Oculus Rift (DK2). In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp. 47-50). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2804408.2804422>
- CREEM-REGEHR, S. H., WILLEMSEN, P., GOOCH, A. A., & THOMPSON, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments. *Perception*, 34(2), 191–204. <https://doi.org/10.1068/p5144>
- CSIKSZENTMIHÁLYI, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper and Row, New York, NY.
- CUMMINGS, J. J., & BAILENSON, J. N. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2), 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- DEB, S., CARRUTH, D. W., SWEEN, R., STRAWDERMAN, L., & GARRISON, T. M. (2017). Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research. *Applied Ergonomics*, 65, 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.03.007>
- DENNISON, M. S., WISTI, A. Z., & D'ZMURA, M. (2016). Use of physiological signals to predict cybersickness. *Displays*, 44, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2016.07.002>
- DESTATIS (2021). *Verkehr – Verkehrsunfälle 2020*. Fachserie 8 Reihe 7. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DICHGANS, J., & BRANDT, T. (1978). Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control. In S. M. Anstis, J.

- Atkinson, C. Blakemore, O. Braddick, T. Brandt, F. W. Campbell, S. Coren, J. Dichgans, P. C. Dodwell, P. D. Eimas, J. M. Foley, R. Fox, L. Ganz, M. Garrett, E. J. Gibson, J. S. Girgus, M. M. Haith, Y. Hatwell, E. R. Hilgard, ... H.-L. Teuber (Eds.), *Perception* (pp. 755–804). Springer Verlag, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46354-9_25
- DODGSON, N. A. (2004). Variation and extrema of human interpupillary distance. In *Stereoscopic displays and virtual reality systems XI* (Vol. 5291, pp. 36–46). International Society for Optics and Photonics.
- DORIC, I., FRISON, A. K., WINTERSBERGER, P., RIENER, A., WITTMANN, S., ZIMMERMANN, M., & BRANDMEIER, T. (2016). A novel approach for researching crossing behavior and risk acceptance: The pedestrian simulator. In *Adjunct Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 39–44). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3004323.3004324>
- DÖRNER, R., & STEINICKE, F. (2019). Wahrnehmungsaspekte von VR. In Dörner (Ed.), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (pp. 43–78). Springer Vieweg, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1_2
- DÖRNER, R., BROLL, W., JUNG, B., GRIMM, P., & GÖBEL, M. (2019). Einführung in Virtual and Augmented Reality. In Dörner (Ed.) *Virtual und Augmented Reality (VR/AR)* (pp. 1–42). Springer Vieweg, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1_2
- DRAPER, M. H., VIIRRE, E. S., FURNESS, T. A., & GAWRON, V. J. (2001). Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within head-coupled virtual environments. *Human Factors*, 43(1), 129–146. <https://doi.org/10.1518/001872001775992552>
- DUDENREDAKTION (O. J.). Immersion. In Duden online. Retrieved July 20, 2021, from <https://www.duden.de/rechtschreibung/Immersion>
- DUH, H. L., LIN, J. W., KENYON, R. V., PARKER, D. E., & FURNESS, T. A. (2001). Effects of field of view on balance in an immersive environment. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001* (pp. 235–240). IEEE.
- FELDSTEIN, I. T., & DYSZAK, G. N. (2020). Road crossing decisions in real and virtual environments: A comparative study on simulator validity. *Accident Analysis & Prevention*, 137, Article 105356. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105356>
- FELDSTEIN, I. T., & ELLIS, S. R. (2020). A Simple Video-Based Technique for Measuring Latency in Virtual Reality or Teleoperation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(9), 3611–3625. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2980527>
- FELDSTEIN, I., DIETRICH, A., MILINKOVIC, S., & BENGLER, K. (2016). A Pedestrian Simulator for Urban Crossing Scenarios. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.531>
- FENG, Y., DUIVES, D. C., & HOOGENDOORN, S. P. (2021). Using virtual reality to study pedestrian exit choice behaviour during evacuations. *Safety Science*, 137, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105158>
- FERNANDES, A. S., & FEINER, S. K. (2016). Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 201–210). IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460053>
- FINNEGAN D.J. (2017). *Compensating for Distance Compression in Virtual Audiovisual Environments [Dissertation]*. University of Bath.
- GHINEA, M., FRUNZĂ, D., CHARDONNET, J.-R., MERIENNE, F., & KEMENY, A. (2018). Perception of Absolute Distances within Different Visualization Systems: HMD and CAVE. In *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics* (pp. 148–161). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95270-3_10
- GIBSON, J. J. (1950). *The perception of the Visual World*. Boston: Houghton Mifflin.
- GOLDSTEIN, E. B. (1997). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.
- GONZALEZ-FRANCO, M., COHN, B., OFEK, E., BURIN, D., & MASELLI, A. (2020). The self-

- avatar follower effect in virtual reality. In 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) (pp. 18-25). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.1580500165557>
- GONZALEZ-FRANCO, M., PEREZ-MARCOS, D., SPANLANG, B., & SLATER, M. (2010). The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment. In 2010 IEEE virtual reality conference (VR) (pp. 111-114). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444805>
- GRAYBIEL, A., WOOD, C. D., MILLER, E. F., & CRAMER, D. B. (1968). Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness. *Aerospace Medicine*, 39(5), 453–455.
- HAMMER, T., PLESS, R., WILL, S., NEUKUM, A., & MERKEL, N. L. (2021). Anwendungsmöglichkeiten von Motorradsimulatoren. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Heft M 323)*. Fachverlag NW der Carl Ed. Schünemann KG: Bremen.
- HARRINGTON, D. O. (1971). *Visual Fields: A Textbook and Atlas of Clinical Perimetry* (3rd ed.). Mosby.
- HOLLÄNDER, K., COLLEY, A., MAI, C., HÄKKILÄ, J., ALT, F., & PFLEGING, B. (2019). Investigating the Influence of External Car Displays on Pedestrians' Crossing Behavior in Virtual Reality. In *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.1145/3338286.3340138>
- IJSSELSTEIJN, W., & RIVA, G. (2003). Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments. *CyberPsychology & Behavior*, 6(6). <https://doi.org/10.1089/109493103322725487>
- INTERRANTE, V., RIES, B., & ANDERSON, L. (2006). Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited. In *Virtual Reality Conference, IEEE* (pp. 3–10). <https://doi.org/10.1109/VR.2006.52>
- JAMSON, H. (2011). Cross-platform validation issues. In D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird & J. D. Lee (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (Kap. 12). Boca Raton [u.a.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
- JAYARAMAN, S.K., CREECH, C., ROBERT, L. P., TILBURY, D. M., YANG, X. J., PRADHAN, A.K., & TSUI, K. M. (2018). Trust in AV: An uncertainty reduction model of AV-pedestrian interactions. In *Companion of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 113-134). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3173386.3177073>
- KALAWSKY, R. (2000). The Validity of Presence as a Reliable Human Performance Metric in Immersive Environments. *Presence 2000 Workshop*, Delft, Netherlands.
- KELLY, J. W., CHEREP, L. A., & SIEGEL, Z. D. (2017). Perceived space in the HTC Vive. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 15(1), 1-16. <https://doi.org/10.1145/3106155>
- KENNEDY, R. S., LILIENTHAL, M. G., BERBAUM, K. S., BALTZLEY, D. R., & MCCAULEY, M. E. (1989). Simulator sickness in U.S. Navy flight simulators. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 60(1), 10–16.
- KERSCHBAUM, P., LORENZ, L., & BENGLER, K. (2014). Highly automated driving with a decoupled steering wheel. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 1686–1690. <https://doi.org/10.1177/1541931214581352>
- KESHAVA, A., NEZAMI, F. N., MALEKI, N., TIEMANN, L., & KÖNIG, P. (2021). Stress testing VR Eye-tracking System Performance. Paper presented at the Neuroergonomics Conference, 11 bis 16. September 2021, München.
- KESHAVARZ, B., HETTINGER, L. J., VENA, D., & CAMPOS, J. L. (2013). Combined effects of auditory and visual cues on the perception of vection. *Experimental Brain Research*, 232(3), 827–836. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3793-9>
- KILTENI, K., GROTEN, R., & SLATER, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373-387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124

- KIM, K., ROSENTHAL, M. Z., ZIELINSKI, D. J., & BRADY, R. (2014). Effects of virtual environment platforms on emotional responses. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(3), 882–893. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.024>
- KITAGAWA, M., & WINDSOR, B. (2012). *MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture*. Focal Press, Waltham.
- KNAPP, J. M., & LOOMIS, J. M. (2004). Limited Field of View of Head-Mounted Displays Is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5), 572–577. <https://doi.org/10.1162/1054746042545238>
- KOKKINARA, E., SLATER, M., & LÓPEZ-MOLINER, J. (2015). The Effects of Visuomotor Calibration to the Perceived Space and Body, through Embodiment in Immersive Virtual Reality. *ACM Transactions on Applied Perception*, 13(1), 1–22. <https://doi.org/10.1145/2818998>
- KOVÁČSOVÁ, N., GROTTOLI, M., CELIBERTI, F., LEMMENS, Y., HAPPEE, R., HAGENZIEKER, M. P., & DE WINTER, J. C. (2020). Emergency braking at intersections: A motion-base motorcycle simulator study. *Applied Ergonomics*, 82, 102970.
- KUHL, S. A., THOMPSON, W. B., & CREEM-REGEHR, S. H. (2009). HMD calibration and its effects on distance judgments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 6(3), 1–20. <https://doi.org/10.1145/1577755.1577762>
- LARGE, D. R., BANKS, V., BURNETT, G., & MARGARITIS, N. (2017). Putting the joy in driving: investigating the use of a joystick as an alternative to traditional controls within future autonomous vehicles. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 31–39).
- LAWSON, B. (2015). Motion Sickness Symptomatology and Origins. In K. S. Hale / K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of Virtual Environments* (2nd ed., pp. 531–600). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17360-29>
- LEIBOWITZ, H. W., POST, R. B., & SHEEHY, J. B. (1986). Efference, perceived movement, and illusory displacement. *Acta Psychologica*, 63(1), 23–34. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(86\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(86)90040-5)
- LEYRER, M., LINKENAUER, S. A., BÜLTHOFF, H. H., KLOOS, U., & MOHLER, B. (2011). The influence of eye height and avatars on egocentric distance estimates in immersive virtual environments. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (pp. 67–74). <https://doi.org/10.1145/2077451.2077464>
- LINKENAUER S.A., LEYRER M., BÜLTHOFF H.H. AND MOHLER B.J. (2013). Welcome to Wonderland: The Influence of the Size and Shape of a Virtual Hand On the Perceived Size and Shape of Virtual Objects. *PLoS ONE*, 8(7), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068594>
- LOMBARD, M., & DITTON, T. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- LOOMIS, J.M. & KNAPP, J.M. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In L.J. Hettinger & M.W. Haas (Eds.), *Virtual and adaptive environments*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- MALLARO, S., RAHIMIAN, P., O'NEAL, E. E., PLUMERT, J. M., & KEARNEY, J. K. (2017). A comparison of head-mounted displays vs. Large-screen displays for an interactive pedestrian simulator. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1145/3139131.3139171>
- MALONE, S., & BRÜNKEN, R. (2021). Hazard Perception, Presence, and Simulation Sickness – A Comparison of Desktop and Head-Mounted Display for Driving Simulation. *Frontiers in Psychology*, 12, 647723. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.647723>
- MANSOR, N.N.; JAMALUDDIN, M.H.; SHUKOR, A.Z. (2017). Concept and application of virtual reality haptic technology: A review. *Journal of Theoretical and Applied Information Theory*, 95, 3320 – 3326.

- MASELLI, A., & SLATER, M. (2013). The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(83), 83. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00083>
- MCMAHAN, A. (2003). Immersion, engagement, and presence: A method for analyzing 3-D video games. In W. Mark & B. Perron (Eds.), *The video game theory reader* (pp. 67–86), New York, NY, USA: Routledge
- MCMANUS, M., D'AMOUR, S., & HARRIS, L. R. (2017). Using optic flow in the far peripheral field. *Journal of Vision*, 17(8), 3. <https://doi.org/10.1167/17.8.3>
- MEIR, A., ORON-GILAD, T., PARMET, Y. (2015). CAN CHILD-PEDESTRIANS' HAZARD PERCEPTION SKILLS BE ENHANCED? ACCIDENT ANALYSIS AND PREVENTION, 83, 101-110.
- MOHLER, B. J., CREEM-REGEHR, S. H., THOMPSON, W. B., & BÜLTHOFF, H. H. (2010). The Effect of Viewing a Self-Avatar on Distance Judgments in an HMD-Based Virtual Environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(3), 230–242. <https://doi.org/10.1162/pres.19.3.230>
- MORALES-ALVAREZ, W., SIPELE, O., LÉBERON, R., TADJINE, H. H., & OLAVERRI-MONREAL, C. (2020). Automated driving: A literature review of the take over request in conditional automation. *Electronics*, 9(12), 2087.
- MOURANT, R. R., & SCHULTHEIS, M. T. (2001). A HMD-Based Virtual Reality Driving Simulator. In *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design: Driving Assessment 2001* (pp. 300–304). <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1061>
- MOUSSAÏD, M., KAPADIA, M., THRASH, T., SUMNER, R.W., GROSS, M., HELBING, D., HÖLSCHER, C. (2016). CROWD BEHAVIOUR DURING HIGH-STRESS EVACUATIONS IN AN IMMERSIVE VIRTUAL ENVIRONMENT. *Journal of The Royal Society Interface* 13(122), 20160414.
- MÜTTERLEIN, J. (2018, January 1). The three pillars of virtual reality? Investigating the roles of immersion, presence, and interactivity [Paper presentation]. *Proceedings of the 51st Hawaii international conference on system sciences, Waikoloa Village, Hawaii*. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2018.174>
- NASAR, J., HECHT, P., & WENER, R. (2008). Mobile telephones, distracted attention, and pedestrian safety. *Accident Analysis and Prevention*, 40(1), 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.04.005>
- NG, A.K., CHAN, L.K., & LAU, H. (2018). A Study of Cybersickness and Sensory Conflict Theory Using a Motion-Coupled Virtual Reality System. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 643-644). IEEE.
- NGUYEN-VO, T., RIECKE, B. E., STUERZLINGER, W., PHAM, D. M., & KRUIJFF, E. (2019). Naviboard and navichair: Limited translation combined with full rotation for efficient virtual locomotion. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 27(1), 165-177.
- NILSSON, N., NORDAHL, R., & SERAFIN, S. (2016). Immersion Revisited: A Review of Existing Definitions of Immersion and Their Relation to Different Theories of Presence. *Human Technology*, 12, 108–134. <https://doi.org/10.17011/ht/urn.201611174652>
- O'HERN, S., OXLEY, J., & STEVENSON, M. (2017). Validation of a bicycle simulator for road safety research. *Accident Analysis & Prevention*, 100, 53-58.
- PAI MANGALORE, G. (2019). The Promise of VR Headsets: Validation of a Virtual Reality Headset-Based Driving Simulator for Measuring Drivers' Hazard Anticipation Performance. [Master's thesis, University of Massachusetts Amherst]. <https://doi.org/10.7275/15208425>
- PALA, P., CAVALLO, V., DANG, N. T., GRANIE, M. A., SCHNEIDER, S., MARUHN, P., & BENGELER, K. (2021). Analysis of street-crossing behavior: comparing a cave simulator and a head-mounted display among younger and older adults. *Accident Analysis and Prevention*, 152, 106004. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106004>
- PERRET, J. & VAN DER POORTEN, E. (2018). Touching virtual reality. A review of haptic gloves. In *Proceedings of the ACTUATOR 2018:*

- 16th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 25 – 27 Juni 2018. VDE Verlag GmbH: Berlin, Deutschland, 2018; S. 1 – 5.
- REASON, J. T., & BRAND, J. J. (1975). Motion sickness. Academic Press, London.
- REBENITSCH, L. (2015). Managing cybersickness in virtual reality. *XRDS: Crossroads, The ACM Magazine for Students*, 22(1), 46–51. <https://doi.org/10.1145/2810054>
- REBENITSCH, L., & OWEN, C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, 20(2), 101–125. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>
- RENNER, R. S., VELICHKOVSKY, B. M., & HELMERT, J. R. (2013). The perception of egocentric distances in virtual environments—a review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 46(2), 1-40.
- RIECKE, B. E. (2011). Compelling self-motion through virtual environments without actual self-motion: using self-motion illusions (“vection”) to improve user experience in VR. *Virtual reality*, 2011, 8. Jg., Nr. 1, S. 149-178. <https://doi.org/10.5772/13150>
- RIECKE, B. E., SCHULTE-PELKUM, J., CANIARD, F., & BÜLTHOFF, H. H. (2005). Influence of Auditory Cues on the visually-induced Self-Motion Illusion (Circular Vection) in virtual reality. In: 8th International Workshop on Presence (PRESENCE 2005). University College London, 2005. S. 49-57.
- RIEGLER, A., RIENER, A., & HOLZMANN, C. (2019). AutoWSD: Virtual Reality Automated Driving Simulator for Rapid HCI Prototyping. In Alt, F., Bulling, A. & Döring, T. (Eds.), *Mensch und Computer 2019*. New York, NY. <https://doi.org/10.1145/3340764.3345366>
- RIETZLER, M., GUGENHEIMER, J., HIRZLE, T., DEUBZER, M., LANGBEHN, E., & RUKZIO, E. (2018). Rethinking redirected walking: On the use of curvature gains beyond perceptual limitations and revisiting bending gains. In 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) (pp. 115-122). IEEE
- ROSIER, C. W. (2019). Influence of accelerator pedal force feedback on truck drivers' speed control. Dissertation. University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.37725>
- SANCHEZ-VIVES, M. V., & SLATER, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4), 332–339. <https://doi.org/10.1038/nrn1651>
- SATO, A., & YASUDA, A. (2005). Illusion of sense of self-agency: Discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, 94(3), 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.04.003>
- SCHNEIDER, S., & BENGLER, K. (2020). Virtually the same? Analysing pedestrian behaviour by means of virtual reality. *Transportation research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 68, 231-256.
- SCHNEIDER, S., MARUHN, P., & BENGLER, K. (2018). Locomotion, Non-Isometric Mapping and Distance Perception in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Computer and Automation Engineering* (pp. 22–26). <https://doi.org/10.1145/3192975.3193022>
- SCHUMANN, J., GODTHELP, J., HOEKSTRA, W. (1992). An exploratory simulator study on the use of active control devices in car driving. Final Report (Report No. IZF 1992 B-2). Soesterberg, Netherlands. Institute for Perception TNO.
- SHERIDAN, T. B. (1992). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 120–126. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>
- SLATER, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560–565. <https://doi.org/10.1162/105474699566477>
- SLATER, M. (2003). A Note on Presence Terminology. *Presence Connect*, 3(3), 1-5.
- SLATER, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions*

- of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1535), 3549–3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- SLATER, M. (2018). Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology* (London, England: 1953), 109(3), 431–433. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- SLATER, M., SPANLANG, B., & COROMINAS, D. (2010). Simulating Virtual Environments within Virtual Environments as the Basis for a Psychophysics of Presence. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4), 1–9. <https://doi.org/10.1145/1833351.1778829>
- SLATER, M., USOH, M., & STEED, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence*, 3, 130–144. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.130>
- SOBHANI, A., & FAROOQ, B. (2018). Impact of smartphone distraction on pedestrians' crossing behaviour: An application of head-mounted immersive virtual reality. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 228–241. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.020>
- STAUFFERT, J.-P., NIEBLING, F., & LATOSCHIK, M. E. (2020). Latency and Cybersickness: Impact, Causes, and Measures. A Review. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 31. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.582204>
- STEED, A., PAN, Y., ZISCH, F., & STEPTOE, W. (2016). The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality. In 2016 IEEE virtual reality (VR) (pp. 67–76). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504689>
- STEINICKE, F., BRUDER, G., JERALD, J., FRENZ, H., & LAPPE, M. (2009). Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(1), 17–27.
- SUMA, E. A., BRUDER, G., STEINICKE, F., KRUM, D. M., & BOLAS, M. (2012, March). A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments. In 2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW) (pp. 43–46). IEEE.
- SUWARNO, D. C. D., WIJAYANTO, T., & TRAPSI-LAWATI, F. (2019). Cybersickness Evaluation While using Driving Simulator in a Head-Mounted Display Environment. In 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE) (pp. 103–106). IEEE.
- TABONE, W., DE WINTER, J., ACKERMANN, C., BÄRGMAN, J., BAUMANN, M., DEB, S., ... & STANTON, N. A. (2021). Vulnerable road users and the coming wave of automated vehicles: Expert perspectives. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100293>
- TAHERI, M., MATSUSHITA, K., & SASAKI, M. (2017). Development of a Driving Simulator with Analyzing Driver's Characteristics Based on a Virtual Reality Head Mounted Display. *Journal of Transportation Technologies*, 7(3), 351–366. <https://doi.org/10.4236/jtts.2017.73023>
- TAPIRO, H., ORON-GILAD, T., & PARMET, Y. (2016). Cell phone conversations and child pedestrian's crossing behavior; a simulator study. *Safety Science*, 89, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.013>
- THOMPSON, W. B., WILLEMSSEN, P., GOOCH, A. A., CREEM-REGEHR, S. H., LOOMIS, J. M., & BEALL, A. C. (2004). Does the quality of the computer graphics matter when judging distances in visually immersive environments? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5), 560–571. <https://doi.org/10.1162/1054746042545292>
- THRASH, T., KAPADIA, M., MOUSSAID, M., WILHELM, C., HELBING, D., SUMNER, R.W., HÖLSCHER, C. (2015). EVALUATION OF CONTROL INTERFACES FOR DESKTOP VIRTUAL ENVIRONMENTS. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 24(4), 322–334.
- WALLER, D., & RICHARDSON, A. R. (2008). Correcting distance estimates by interacting with immersive virtual environments: Effects of task and available sensory information. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(1), 61–72. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.14.1.61>
- WARREN, W. H., & HANNON, D. J. (1988). Direction of self-motion is perceived from optical flow.

- Nature, 336(6195), 162–163. <https://doi.org/10.1038/336162a0>
- WATSON, M. R. & ENNS, J. T. (2012). Depth Perception. In V. S. Ramachandran (Eds.), *Encyclopedia of human behavior* (2nd ed., pp. 690-696). Academic Press, Boston.
- WEBER, S., WEIBEL, D., & MAST, F. W. (2021). How to Get There When You Are There Already? Defining Presence in Virtual Reality and the Importance of Perceived Realism. *FRONTIERS IN PSYCHOLOGY*, 12:628298. [HTTPS://DOI.ORG/10.3389](https://doi.org/10.3389/ORG/10.3389)
- WEIDNER, F., HOESCH, A., POESCHL, S., & BROLL, W. (2017). Comparing VR and non-VR driving simulations: An experimental user study. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, Los Angeles, CA, March 18-22 (pp. 281-282). <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892286>
- WEIR, D. H., & CLARK, A. J. (1995). A survey of mid-level driving simulators (SAE Tech. Paper 950172). Warrendale, PA: Society of Automobile Engineers.
- WILLEMSSEN, P., COLTON, M. B., CREEM-REGHEER, S. H., & THOMPSON, W. B. (2004). The effects of head-mounted display mechanics on distance judgments in virtual environments. In *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization* (pp. 35–38). <https://doi.org/10.1145/1012551.1012558>
- WITMER, B. G., & SINGER, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- WYNNE, R. A., BEANLAND, V., & SALMON, P. M. (2019). Systematic review of driving simulator validation studies. *Safety Science*, 117, 138-151.
- YEO, D., KIM, G., & KIM, S. (2020). Toward immersive self-driving simulations: Reports from a user study across six platforms. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12). <https://doi.org/10.1145/3313831.3376787>
- YOUNG, M. K., GAYLOR, G. B., ANDRUS, S. M., & BODENHEIMER, B. (2014). A comparison of two cost-differentiated virtual reality systems for perception and action tasks. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp. 83-90). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2628257.2628261>
- ZELTZER, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 127-132. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>
- ZÖLLER, C., MÜLLER, A. L., WINNER, H., & ABENDROTH, B. (2019). Applicability of Head-Mounted Displays in Driving Simulation, DSC 2019 Europe, September 04-06, Straßburg.

Bilder

- Bild 1: Überblick über mögliche Teilsysteme eines VR-Systems nach DÖRNER et al. (2019)
- Bild 2: Einsatz eines omnidirektionales Laufbands (links) und der Sensorschuhe (rechts) mit einer VR-Brille in der Fußgängersimulation des DLR. Quelle: DLR
- Bild 3: Schematische Skizze der vier vorgeschlagenen Systemvarianten und Anzahl der szenarioübergreifenden Nennungen

Tabellen

- Tab. 1: Merkmalsübersicht aktueller VR-Brillen laut Angaben der Hersteller
- Tab. 2: Übersicht über Fußgängerstudien mit VR-Systemen
- Tab. 3: Übersicht über Pkw-Studien mit VR-Systemen
- Tab. 4: Übersicht über den Kriterienkatalog
- Tab. 5: Übersicht über Ablauf und Inhalte der Experteninterviews
- Tab. 6: Gründe für und gegen die Verwendung autarker bzw. kabelgebundener VR-Brillen

- Tab. 7: Anzahl der Nennungen der ausgewählten Fortbewegungstechniken und ihre Vor- und Nachteile
- Tab. 8: Anzahl der Nennungen der ausgewählten Technologien zur Erfassung einer Ausweichbewegung und ihrer Eigenschaften
- Tab. 9: Anzahl der Nennungen je Systemvariante und Szenario
- Tab. 10: Beurteilung der hinreichenden Eignung der drei Systemvarianten in Abhängigkeit der definierten Anforderungen
- Tab. 11: Übersicht über die Forschungsthemen und die damit verbundenen Anforderungen
- Tab. 12: Vorschläge zur technischen Umsetzung der drei Systemvarianten
- Tab. 13: Vergleich der Systemvarianten nach den Dimensionen des Kriterienkatalogs

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Mensch und Sicherheit“

2020

M 294: Förderung eigenständiger Mobilität von Erwachsenen mit geistiger Behinderung

Markowetz, Wolf, Schwaferts, Luginer, 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 Fahrzeugsicherheitssystemen 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, Krens € 17,50

M 298: Zahlungsbereitschaft für Verkehrssicherheit

Obermeyer, Hirte, Korneli, Schade, Friebe € 18,00

M 299: Systematische Untersuchung sicherheitsrelevanter Fußgängerverhaltens

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, Straßgüt € 15,50

AKTUALISIERTE NEUAUFLAGE VON:

M 115: Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung – gültig ab 31.12.2019

Gräcman, 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, Zens
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, Kauschner € 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, Rucker € 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 Pedelec-Fahrern

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, Kauschner, 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: Influencer in der Verkehrssicherheitskommunikation: Konzeptentwicklung und pilothafte Anwendung

Duckwitz, Funk, Hielscher, Schröder, Schrauth, Seegers, Kraft, Geib, Fischer, Schnabel, Veigl € 19,50

M 324: Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse und Bewertung von Radverkehrsunfällen

Baier, Cekic, Engelen, Baier, Jürgensohn, Platho, Hamacher

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

M 325: Eignung der Fahrsimulation zur Beurteilung der Fahr-sicherheit bei Tagesschläfrigkeit

Kenntner-Mabiala, Ebert, Wörle, Pearson, Metz, Kaussner, Hargutt

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

M 326: Kinderunfallatlas 2015–2019

Suing, Auerbach, Färber, Treichel € 22,50

M 327: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen 2019

Gruschwitz, Pirsig, Hölscher, Hoß, Woopen, Schulte € 17,50

M 328: Evaluation des Carsharinggesetzes

Kurte, Esser, Wittowsky, Groth, Garde, Helmrich

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

M 329: Nutzung von Mobiltelefonen beim Radfahren – Prävalenz, Nutzermerkmale und Gefahrenpotenziale

Evers, Gaster, Holte, Suing, Surges € 17,50

M 330: Ausbildungs- und Evaluationskonzept zur Optimierung der Fahrausbildung in Deutschland

Sturzbecher, Brünken, Bredow, Genschow, Ewald, Klüver, Thüs, Malone

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

M 331: E-Learning Unterrichtskonzepte für die Fahranfänger-vorbereitung

Hilz, Malone, Brünken

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

M 332: Experimentelle Studie zu Protanopie und Wahrnehmung von Bremsleuchten

Helmer, Trampert, Schiefer, Ungewiß, Baumann, Feßler

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

M 333: Expertise zum Projektbericht VALOR

Link

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

2023

M 334: Unfallbeteiligung von Wohnmobilen 2010 bis 2020

Färber, Pöppel-Decker, Schönebeck

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

M 335: Evaluation der Kampagne „Runter vom Gas!“ 2016-2019

Petersen, Vollbracht

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

M 336: Die Entwicklung verkehrssicherheitsrelevanter Personenmerkmale im höheren Lebensalter und ihre Einflussfaktoren – Erste Querschnittsanalysen aus der Dortmunder-Bonner-Längsschnittstudie (DoBoLSiS)

Karthus, Getzmann, Wascher, Graas, Rudinger

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

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

Platho, Tristram, Kupschick € 17,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

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