
Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 167

Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

von

Sebastian Gary, Christian Maag, Nora Merkel, Alexandra Neukum
Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 167

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 82.0798
Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

Fachbetreuung:
Alexander Frey, Marvin Schrage

Referat:
Automatisiertes Fahren

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307 | ISBN 978-3-95606-869-0 | <https://doi.org/10.60850/bericht-f167>

Bergisch Gladbach, Juli 2025

Kurzfassung/Abstract

Mit der Technologie der Teleoperation kann ein Fahrzeug aus der Ferne, d.h. von außerhalb des Fahrzeugs, unterstützt und gesteuert werden. Auf diese Weise kann z.B. autonomen Fahrzeugen in Situationen assistiert werden, in denen sie nicht selbständig agieren können. Daneben bilden telegefahrene Taxis oder Car-Sharing Fahrzeuge weitere beispielhafte Anwendungsgebiete dieser Art der Fahrzeugsteuerung.

Bei der Teleoperation werden Informationen zum Fahrzeugzustand und -umfeld wie z.B. Sensordaten und Videobilder, vom Fahrzeug an ein Kontrollzentrum übertragen. Dort werden die Daten einer menschlichen teleoperierenden Person zur Verfügung gestellt, die Unterstützungs- bzw. Steuerbefehle erzeugt. Diese werden dann zur Ausführung an das Fahrzeug zurückgesendet. Bei der Teleoperation von Fahrzeugen wird zwischen Telefahren und Teleassistenz unterschieden. Beim Telefahren führt die teleoperierende Person die Längs- und Querregelung direkt aus, indem sie von einem Leitstand aus anhand der aus dem Fahrzeug übertragenen Informationen die Fahrgeschwindigkeit regelt und das Lenken übernimmt. Bei der Teleassistenz unterstützt die teleoperierende Person das automatisierte Fahrsystem, indem z.B. Wegpunkte vorgegeben, Trajektorien ausgewählt oder Sensorinformationen interpretiert werden und das Fahrzeug anschließend selbstständig weiterfährt.

Die Aufgaben einer teleoperierenden Person unterscheiden sich von der manuellen Steuerung durch eine im Fahrzeug befindliche Person. Entsprechend sind auch die Anforderungen an die teleoperierende Person nicht die gleichen wie an die fahrzeugführende Person, die sich direkt im Fahrzeug befindet. Die größten Herausforderungen bei der Teleoperation von Fahrzeugen liegen in den im Rahmen der Datenübertragung entstehenden Latenzen und der Notwendigkeit eines ausreichenden Situationsbewusstseins bei der teleoperierenden Person. Auch muss sichergestellt werden, dass der Workload während der teleoperierten Steuerung eines Fahrzeugs einen vertretbaren Rahmen nicht überschreitet und die resultierende Fahrperformanz mit der der manuellen Fahrzeugführung vergleichbar ist.

Wie ein geeigneter Leitstand bzw. Arbeitsplatz für das Telefahren und die Teleassistenz aussehen sollte, um den genannten Herausforderungen zu begegnen, steht im Mittelpunkt dieses Forschungsberichts. Ziel ist zum einen die Ableitung begründeter Mindestanforderungen an die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen, die für das Telefahren und die Teleassistenz eingesetzt werden, und zum anderen die Spezifikation von Anforderungen an experimentelle Leitstände, die als Forschungswerkzeug zur Beantwortung offener Forschungsfragen eingesetzt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine umfassende Literaturanalyse zum Stand der Forschung bzgl. der Mensch-Maschine-Interaktion bei der Teleoperation von Fahrzeugen durchgeführt. Anschließend werden bestehende Teleoperatorarbeitsplätze bzw. Leitstände vorgestellt und Kategorien von Teilsystemen abgeleitet, die für die Spezifikation der Anforderungen relevant sind. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Ableitung von empirisch begründeten Mindestanforderungen an die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen aufgrund des Forschungsstands nicht bzw. nur teilweise möglich ist. Um dennoch Min-

destanforderungen abzuleiten, werden neben der empirischen Evidenz auch Anforderungen auf Basis von bewährten Vorgehensweisen in der Praxis (Stand der Technik) und der aktuellen Rechtslage (z.B. zur Typgenehmigung von Fahrzeugen, zur Arbeitsplatzgestaltung) abgeleitet.

Die resultierenden Mindestanforderungen an die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen werden im Hinblick auf die Bereiche Sichtdarstellung (z.B. 180° horizontaler Frontsichtbereich, Darstellung der Egofahrtrajektorie), räumliche Gestaltung, akustische Darstellung der Fahrsituation, Leitstand inkl. Bedienelemente, Unterstützungssysteme (z.B. Auslösung Minimal Risk Maneuver, Spurhalteassistenten), grafische Benutzeroberfläche (z.B. Informationen zu Fahrt und Fahrzeugzustand), Überwachung der Teleoperation (z.B. Datenaufzeichnung, Aufmerksamkeitserkennung, Incident Management), Kommunikationsverbindung (z.B. Latenz < 300 ms, Kommunikationsmöglichkeit mit anderen Personen) und Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes (z.B. Verträglichkeit, Fahrsicherheit) dargestellt.

Basierend auf den spezifizierten Anforderungen an einen experimentellen Leitstand wird ein konkretes technisches Konzept für einen prototypischen Leitstand ausgearbeitet. Dieses wird anschließend in einen Leitstand umgesetzt, der die teleoperierte Steuerung eines virtuellen Fahrzeugs in der Fahrsimulation ermöglicht. Mit Hilfe dieses flexiblen und erweiterungsfähigen Demonstrators können eine Reihe von Forschungsfragen beantwortet werden, die für eine zukünftige sichere, effiziente und akzeptierte teleoperierte Fahrzeugführung zentral sind. Basierend auf den Ergebnissen zukünftiger Forschungsarbeiten zur Mensch-Maschine-Interaktion am Teleoperatorarbeitsplatz sind die in diesem Bericht dargestellten Anforderungen iterativ anzupassen. Ähnliches gilt bei technischen Entwicklungen, die die teleoperierte Fahrzeugführung signifikant verändern.

Psychological and Technical Requirements for Remote Operator Workstations

With teleoperation technology, a vehicle can be supported and controlled remotely, i.e. from outside the vehicle. In this way, for example, autonomous vehicles can be assisted in situations in which the autonomous function reaches its limits. Other exemplary areas of application for this type of vehicle control are teleoperated cabs or car-sharing vehicles.

During teleoperation, information on the vehicle's condition and environment, such as sensor data and video images, is transmitted from the vehicle to a control center. There, the data is made available to a human remote operator who generates support or control commands. These are then sent back to the vehicle for execution. A distinction is made between remote driving and remote assistance. In the case of remote driving, the remote operator carries out the longitudinal and lateral control directly by controlling the driving speed and steering from a control station using the information transmitted from the vehicle. With remote assistance, the remote operator supports the automated driving system by, for example, specifying waypoints, selecting trajectories or modifying sensor information, allowing the vehicle to continue driving autonomously.

The tasks of a remote operator differ from manual control by a person in the vehicle. Accordingly, the requirements the remote operator has to meet are not the same as those applying for a driver located in the vehicle. The greatest challenges in teleoperation lie in the latencies that occur during data transmission and the need for the remote operator to have sufficient situation awareness. It must also be ensured that the operator's workload does not exceed an acceptable level and that the resulting driving performance is comparable to that of a manual vehicle control by a driver in the vehicle.

This research report focuses on what a suitable workstation for remote drivers and remote assistants should look like in order to meet the aforementioned challenges. The aim is firstly to derive well-founded minimum requirements for the design of teleoperation workstations used for remote driving and remote assistance, and secondly to specify requirements for experimental workstations that could be used as research tools to answer open research questions in the field.

In order to achieve this goal, a comprehensive literature analysis of the current state of research on human-machine interaction in the teleoperation of vehicles is carried out. Subsequently, existing teleoperation workstations are described and categories of workstation subsystems are derived that are relevant for the specification of requirements. The results show that it is not or only partially possible to derive empirically based minimum requirements for the design of teleoperation workstations due to the current state of research. In order to derive minimum requirements nonetheless, in addition to empirical evidence, requirements are also derived on the basis of best practices (state of the art) and the current legal situation (e.g. for type approval of vehicles, workplace design).

The resulting minimum requirements for the design of teleoperator workstations are defined with regard to the following areas: visualization (e.g. 180° horizontal front field of view, displaying the driving trajectory of the ego-vehicle), spatial design, acoustic representation of the driving situation, workstation incl. controls, assistance systems (e.g. triggering of minimal risk maneuvers, lane keeping assistance), graphical user interface (e.g. information on driving and vehicle status), monitoring of teleoperation (e.g. data recording, attention detection, incident management), communication connection (e.g. latency < 300 ms, communication with other persons) and acceptance of workstation (e.g. comfort, driving safety).

Based on the specified requirements for an experimental workstation, a concrete technical concept for a prototype workstation is developed. This concept was realized and enables the teleoperation of a virtual vehicle using driving simulation. With the help of this flexible and expandable demonstrator, a number of research questions can be answered that are central to future safe, efficient and accepted teleoperation. Based on the results of future research on human-machine interaction in teleoperation, the requirements presented in this report should be iteratively adapted. The same applies to technical developments that significantly change remote vehicle guidance.

Summary

Psychological and Technical Requirements for Remote Operator Workstations

Introduction and objectives

Teleoperation technology is used to support and control a vehicle remotely, i.e. from outside the vehicle. By this, for example, autonomous vehicles can be assisted in situations in which they cannot continue to operate independently. In addition, teleoperated cabs or car-sharing vehicles are further exemplary areas of application for this type of vehicle control.

During teleoperation, information on the vehicle's condition and environment, such as sensor data and video images, is transmitted from the vehicle to a control centre. There, the data is made available to a remote operator, who generates support and control commands. These are then sent back to the vehicle for execution. A distinction is made between remote driving and remote assistance. In the case of remote driving, the remote operator carries out the longitudinal and lateral control directly by controlling the driving speed and steering from a control station using the information transmitted from the vehicle. With remote assistance, the remote operator supports the automated driving system by, for example, specifying waypoints, selecting trajectories or modifying sensor information, allowing the vehicle to continue driving autonomously. The term remote operator therefore includes remote drivers and remote assistants. In the following, these definitions are used for remote driving and remote assistance:

- Remote driving: The remote driver takes control of the vehicle at navigation, guidance and stabilisation level, whereby the vehicle's own functions (assistance systems), which operate at navigation, guidance and stabilisation level, can support the remote driver in the driving task. The remote operator is responsible for safe driving.
- Remote assistance: Event-related provision of control-relevant recommendations, information or initiation of certain driving manoeuvres by the remote assistant, whereby the vehicle control itself is carried out autonomously by an automated driving system. The automated driving system is responsible for safe driving.

The remote operator workstation and the remote operator do not stand alone as a unit, but are part of control centres and the associated technical, personnel and organisational structures. The tasks of a remote operator differ from the manual control by a driver in the vehicle. Accordingly, the requirements remote operators have to meet are not the same as those applying for a driver located in the vehicle. The greatest challenges in teleoperated driving lie in the latencies that occur during data transmission and the need for

the remote operator to have sufficient situational awareness. It must also be ensured that the operator's workload does not exceed an acceptable level and that the resulting driving performance is comparable to that of a manual vehicle control by a driver in the vehicle.

A central component of the teleoperation system is the workstation of the remote operator. The remote operator receives information about the teleoperated vehicle and the vehicle environment via camera images and sensor information. The remote operator supports and controls the vehicle with the help of screens, control elements and a user interface. The driving task or individual aspects of the driving task alternate between the remote operator, the driver located in the vehicle (if present) and the vehicle (if equipped with an automated driving system) depending on the specific teleoperation mode and the required transitions due to various causes (e.g. operating conditions, traffic situation).

This research report focuses on what a suitable workstation for remote drivers and remote assistants should look like in order to meet the aforementioned challenges. The aim is firstly to derive well-founded minimum requirements for the design of teleoperation workstations used for remote driving and remote assistance, and secondly to specify requirements for experimental workstations that could be used as research tools to answer open research questions in the field.

State of research and technology regarding human-machine interaction in the teleoperation of vehicles

The central requirement for drivers located in the vehicle as well as remote operators is to ensure safe driving of the vehicle. During remote driving, the driving performance must be similar to that of a driver located in the vehicle. To achieve this, it is necessary for the remote operators to be exposed to an appropriate workload, whereby excessive demands must be avoided. Conversely, a workload that is too low can also have a negative impact on driving performance (e.g. due to a lack of attention). Due to the fact that remote operators are not physically present in the vehicle, but experience an indirect representation of the driving situation mediated by video and other modality channels, their workload is subject to a number of specific influencing factors.

In addition to ensuring an appropriate workload for driving, a central requirement of teleoperation for the remote operator is the development of appropriate situation awareness. In this context, situation awareness is the mental representation of the current driving situation by the driver or remote operator. A higher level of situation awareness generally leads to a higher telepresence, i.e. it contributes to the remote operator having the feeling of actually being in the current driving situation.

Remote driving generally leads to a higher workload compared to remote assistance. Another significant influencing factor is the delay in the exchange of information between the remote operator and the vehicle, known as latency. Regarding the influence on the workload and situation awareness of remote drivers, studies show that higher and variable latencies are associated with a higher workload and lower situation awareness than low and constant latencies. Furthermore, the quality of the video stream used to display the driving situation also influences the workload and situation awareness of remote operators. For example, a reduction in the frame rate and resolution (with the aim of reducing latency) can increase visual strain, as relevant objects in the traffic environment are more difficult to recognise and assess in terms of their behaviour. Previous studies have shown that a significant deterioration in driving performance occurs from a frame rate of < 10 fps

at the latest. Displaying additional information and information modalities can increase situation awareness, but can also lead to an undesirable increase in workload.

Latency is a key factor influencing driving performance when driving remotely. Latency is defined as the total time required from the actuation of driving inputs, their transmission from the workstation to the vehicle, their execution in the vehicle to the retransmission and display of the sensor information at the remote operator's workstation (so-called total latency or round-trip time). Large, constant latencies have a less negative effect on performance than small, variable ones. Overall, the negative influence of latencies on the driving performance of remote operators can be assessed as empirically well established, whereby the latency in the case of remote driving should not be greater than 300 ms. This threshold is subject to the restriction that velocities of 35 km/h were rarely exceeded in the underlying studies. Furthermore, lower thresholds for latency appear necessary for certain scenarios (e.g. driving in urban traffic). The extent to which higher latencies are tolerable for remote assistance cannot be answered on the basis of the current state of knowledge.

Predictive displays and assistance functions are among the most frequently mentioned compensation measures in the literature and serve in particular to reduce latency-related negative effects on the workload, situation awareness and driving performance of remote operators. Depending on the design of these measures, the effects of the remote operator's own control inputs, such as the predicted change in the position of the ego vehicle or the predicted positions of other road users, are displayed in the driving scene. Empirical studies on the effectiveness of such predictive displays show positive effects on teleoperation.

Minimum requirements for an ideal remote operator workstation

A review of the available scientific literature on human-machine interaction in teleoperation shows that a number of relevant research questions have not yet been fully answered. In particular, it is only possible to derive requirements and thresholds beyond which safe teleoperation of vehicles can no longer be guaranteed for some influencing factors (e.g. latency, frame rate) and only with restrictions (e.g. with regard to the speed range). For this reason, it is not or only partially possible to derive empirically based minimum requirements for the design of remote operator workstations based on the current state of research.

In order to be able to derive minimum requirements despite the limitations mentioned, the following procedure is chosen: Where possible, requirements are derived on the basis of the available empirical evidence. For aspects for which no empirically validated recommendations can be made due to a lack of sufficient studies, requirements are instead derived on the basis of best practices. In addition, currently applicable legal requirements (e.g. on workplace design, automated driving, type approval of vehicles) are included and taken into account, if they are transferable to the teleoperation of vehicles.

The following requirements can be summarised:

1. In general, a remote operator workstation must fulfil the requirements for the design of visual display unit workstations (e.g. with regard to lighting, movement space).
2. The traffic environment should be displayed on screens with a frame rate of never below 10 fps and 24 fps on average, a horizontal field of view of at least

180° (whereby a swivelling partial view may also be possible in the case of remote assistance) and a vertical field of view of at least 40°. A display of the rear view is also mandatory. Furthermore, the current ego trajectory should be displayed as a visual aid in front and rear view depending on the current direction of travel.

3. For remote driving, the workstation should consist of a generic mock-up including the primary (i.e. steering wheel, pedals) and secondary (e.g. indicators, light, horn) controls. In the case of remote assistance, the workstation should be implemented depending on the allocation of the driving tasks between the remote assistant and the vehicle. Both teleoperation variants require a physical control element to trigger a minimal risk manoeuvre (see no. 5). The remote operator must be informed of the most important data (in particular the current teleoperation mode, the current latency, the driving speed, the speed limit and the vehicle and system status) via a suitable user interface.
4. The overall latency must be less than 300 ms. Furthermore, proof must be provided for remote driving use cases that the driving performance and safety are appropriate for the expected scenarios, given the quality of the communication link. It must also be possible for the remote operator to communicate with the occupants or control centre.
5. Furthermore, a safety system must be implemented that transfers the teleoperated vehicle to a safe state if the connection is lost or the connection quality is too poor (minimal risk maneuver). For remote driving, an emergency brake assist and a lane change assist as well as a lane departure warning or lane keeping assist should also be available. With regard to lane departure warning, there is the limitation that, based on the current state of research, it is not clear whether the use of such systems generally has a positive effect on driving performance. In addition, it is not yet clear whether or to what extent these systems need to be technically and conceptually adapted to remote driving.
6. In addition, appropriate incident management is required to record, document and evaluate incidents so that future incidents can be avoided. For this purpose, the recording and logging of certain data during remote driving is required (e.g. video recordings of the driving environment, data of the vehicle, operating inputs of the remote operator). Moreover, an attention and drowsiness detection system must be available at the remote operator workstation.
7. Before a remote operator workstation is actually used, it must be approved. To this end, remote operators must not experience excessive levels of discomfort (or motion sickness). Furthermore, in the case of remote driving, it must be demonstrated that a comparable driving performance is achieved as with manual control and presence of a driver in the vehicle.

The minimum requirements described for a remote operator workstation do not guarantee the safety of teleoperation as a whole. On the one hand, a number of other subsystems (e.g. control centre, communication link) are necessary for safe teleoperation; on the other hand, the minimum requirements for the remote operator workstation only define a basis for remote driving and remote assistance. For this reason, every operating company of teleoperated vehicles must check whether situations may arise in the course of their

operations that necessitate further requirements for the design of the remote operator workstation.

Conception and realisation of an experimental workstation for remote driving

Before a broader introduction of teleoperation in public road transport is possible, future studies will intensively investigate the design of the remote operator workstation. This requires a research environment that makes it possible to investigate the central role of the remote operator workstation by allowing the various influencing variables to be varied in a controlled manner.



For this purpose, a concrete technical concept for a prototypical experimental workstation was developed and implemented, which enables the teleoperated control of a virtual vehicle in a driving simulation. With the help of this flexible and expandable demonstrator, a number of research questions can be answered that are central for future safe, efficient and accepted teleoperation.

Based on the results of future research into human-machine interaction at the remote operator's workstation, the requirements presented in this report should be iteratively adapted. The same applies to technical developments that significantly change teleoperated vehicle guidance.

Inhalt

Abkürzungen	14
1 Einführung	15
1.1 Teleoperiertes Fahren und Begriffsbestimmung	15
1.2 Teleoperatorarbeitsplatz und Gesamtsystem des teleoperierten Fahrens	16
1.3 Forschungsbedarf	17
1.4 Fragestellung und Struktur des Berichts	19
2 Literaturanalyse zur Mensch-Maschine-Interaktion bei der Teleoperation von Fahrzeugen	21
2.1 Anforderungen, Workload und Situationsbewusstsein	21
2.2 Leistungsgrenzen und Fahrperformanz	26
2.3 Unterstützung und Kompensation	29
2.4 Zusammenfassende Bewertung	34
3 Beschreibung bestehender Teleoperatorarbeitsplätze	36
3.1 Bestandsaufnahme bestehender Teleoperatorarbeitsplätze	36
3.1.1 Leitstand	36
3.1.2 Benutzeroberfläche	39
3.2 Kategorisierungsaspekte von Teleoperatorarbeitsplätzen	40

4	Konzept eines ideal-typischen Leitstands	46
4.1	Herausforderungen bei Ableitung von empirisch begründeten Mindestanforderungen	46
4.2	Mindestanforderungen an den Aufbau des Leitstands	46
4.2.1	Gesetzliche Anforderungen	46
4.2.2	Mindestanforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze	49
4.3	Weitere Empfehlungen für eine verkehrssichere Teleoperation	57
5	Konzeption eines experimentellen Leitstands	63
5.1	Experimentalpsychologische Grundlagen	63
5.1.1	Experimentelle Untersuchungen und empirischer Forschungsprozess	63
5.1.2	Gütekriterien quantitativer Forschung	65
5.1.3	Grundlagen der Evaluationsforschung	66
5.2	Anforderungen an experimentelle Leitstände	66
5.2.1	Überlegungen zur simulationsbasierten Teleoperation	67
5.2.2	Experimentalpsychologische Anforderungen	67
5.2.3	Anforderungen an Human-Machine-Interfaces	73
5.2.4	Übersicht über Anforderungen an experimentelle Teleoperatorarbeitsplätze	75
6	Technische Anforderungen an einen experimentellen Leitstand	81
6.1	Anforderungen an den Hardwareaufbau	81
6.1.1	Leitstand	81
6.1.2	Versuchsleitungsplatz	83
6.2	Anforderungen an Software und Bedienkonzept	85
6.3	Technische Schnittstelle zwischen Leitstand und Fahrzeug	86
6.4	Modulare Fahrplattform	87
6.4.1	Modulare Fahrplattform in realgetreuer Größe	88
6.4.2	Modulare Fahrplattform in skaliertem Maßstab	94

7	Prototypische Umsetzung eines Teleoperations-Leitstands _____	100
7.1	Leitstand _____	100
7.2	Fahrsimulation und simuliertes Fahrzeug _____	103
7.2.1	Datenübermittlung zwischen Leitstand und SILAB bzw. simuliertem Fahrzeug _____	103
7.2.2	Szenarien _____	104
7.3	Graphische Benutzeroberfläche und Bedienfunktionen _____	105
7.3.1	Interaktionskonzept für das Teleoperationspersonal _____	105
7.3.2	Bedienkonzept für die Versuchsleitung _____	108
7.3.3	Variierbarkeit teleoperationsrelevanter Einflussfaktoren _____	108
8	Fazit und Ausblick _____	111
	Literatur _____	113
	Bilder _____	118
	Tabellen _____	119

Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control
AR	Augmented Reality
AV	Abhängige Variable
CAN	Controller Area Network
CRT	Cathode Ray Tube
DRT	Detection Response Task
EEG	Elektroenzephalografie
FAS	Fahrerassistenzsystem
fps	Frames per Second
GUI	Graphical User Interface
HMD	Head-Mounted Display
HMI	Human-Machine Interface
ISA	Intelligent Speed Assist
LCD	Liquid-Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
LIDAR	Light detection and ranging
MRM	Minimal Risk Maneuver
ODD	Operational Design Domain
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PDT	Peripheral Detection Task
SuRT	Surrogate Reference Task
SV	Störvariable
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UV	Unabhängige Variable
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einführung

1.1 Teleoperiertes Fahren und Begriffsbestimmung

Der Begriff Teleoperation bezeichnet im Kontext der Fahrzeugführung die Einflussnahme durch eine Instanz, die sich außerhalb des Fahrzeugs befindet. Teleoperation stellt damit neben einer menschlichen, sich unmittelbar im Fahrzeug befindlichen Person und der Fahrzeugautomatisierung eine dritte Steuerungsform dar, die die beiden anderen Steuerungsformen ganz oder teilweise substituieren kann. Insbesondere im Bereich des autonomen Fahrens (SAE Level 4 und 5) sehen aktuelle Absicherungskonzepte den Einsatz von Teleoperation als Rückfallebene vor: Erreicht ein autonomes Fahrsystem eine Systemgrenze, erfolgt die Übernahme der Fahraufgabe durch eine Person, die die Steuerung per Teleoperation übernimmt statt direkt vor Ort im Fahrzeug. Gleichzeitig bilden neue Business-Modelle wie telegefahrene Taxis oder Car-Sharing ein breites Spektrum an Basisanwendungen für die teleoperierte Fahrzeugsteuerung. Dabei werden teleoperierend tätige Personen mit neuartigen Aufgaben und insbesondere einer speziellen Umgebung, dem sog. Teleoperatorarbeitsplatz, konfrontiert, die sich zwangsläufig von den Aufgaben und der Umgebung der manuellen Fahrzeugführung im Fahrzeug unterscheiden. Beispielsweise erhalten teleoperierende Personen aufgrund der Tatsache, dass sie selbst nicht unmittelbar im Fahrzeug präsent sind, einen durch Video- und andere Kanäle vermittelten und damit veränderten Eindruck über das Fahrgeschehen. Es ist davon auszugehen, dass zur Teleoperation von Fahrzeugen oder Fahrzeugflotten entsprechende Teleoperatorarbeitsplätze in Kontrollzentren eingebunden sind, in denen Aufgaben koordiniert werden.

Aus personeller Sicht ergeben sich dabei unterschiedliche Anforderungen je nach eingenommener Rolle innerhalb von Kontrollzentren. Schrank & Kettwich (2021) unterscheiden in diesem Zusammenhang zwischen zentralen und peripheren Rollen. Während beispielsweise technisches Servicepersonal und Personal zur Instandhaltung zu den peripheren Rollen gezählt werden, die nicht unmittelbar an der sicheren Teleoperation einzelner Fahrzeuge oder einer ganzen Flotte beteiligt sind, zählt der die aktiv teleoperierende Person zu den zentralen Rollen.

Gemäß SAE J3016 ist bei der Teleoperation zwischen Remote Assistance (Teleassistentz) und Remote Driving (Telefahren) zu unterscheiden:

- Während Remote Assistance eine anlassbezogene Bereitstellung von steuerungsrelevanten Empfehlungen oder die Initiierung bestimmter Fahrmanöver, wie die Auswahl von Fahrtrajektorien oder die Initiierung von Fahrstreifenwechseln, bezeichnet,
- umfasst Remote Driving die vollständige Übernahme der Fahrzeugsteuerung auf Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene.

Die Teleoperation ist damit der Oberbegriff für die beiden Teleoperationskonzepte Remote Driving bzw. Telefahren auf der einen und Remote Assistance bzw. Teleassistentz auf der anderen Seite. Der Aufgabenbereich des Teleoperationspersonals kann somit sowohl im Telefahren als auch in der Teleassistentz liegen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die beiden Konzepte unterschiedliche Qualifikationen voraussetzen, sodass jeweils speziell qualifiziertes Personal die Aufgaben übernimmt. Im vorliegenden Bericht werden folgende Definitionen für das Telefahren (Remote Driving) und die Teleassistentz (Remote Assistance) verwendet (Tab. 1):

Teleoperations-konzept	Definition
Telefahren / Remote Driving	Übernahme der Fahrzeugsteuerung auf Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene durch eine teleoperierende Person, wobei fahrzeugeigene Funktionen, die auf Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene wirken, bei der Fahraufgabe unterstützen können. Die teleoperierende Person ist für die sichere Fahrt verantwortlich.
Teleassistentz / Remote Assistance	Anlassbezogene Bereitstellung von steuerungsrelevanten Empfehlungen bzw. Informationen oder Initiierung bestimmter Fahrmanöver durch die per Teleoperation assistierende Person, wobei die Fahrzeugsteuerung selbst von einem entsprechenden Fahrsystem autonom durchgeführt wird. Das autonome Fahrsystem ist für die sichere Fahrt verantwortlich.

Tab. 1: Definition von Telefahren und Teleassistentz.

1.2 Teleoperatorarbeitsplatz und Gesamtsystem des teleoperierten Fahrens

Der Teleoperatorarbeitsplatz und mit ihm das Teleoperationspersonal stehen nicht als Einheit für sich allein, sondern sind Teil von Kontrollzentren und damit einhergehender technischer, personeller sowie organisationaler Strukturen. Dies legt bei der Betrachtung von Teleoperatorarbeitsplätzen einen System-of-Systems-Ansatz nahe (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2023), in dem die verschiedenen Komponenten wiederum aus eigenständigen, interagierenden Systemen bestehen. Das System-of-Systems des teleoperierten Fahrzeugbetriebs besteht hauptsächlich aus den folgenden Teilsystemen:

- Teleoperierende Person: Überwacht, unterstützt oder steuert teleoperierte Fahrzeuge im Kontrollzentrum.
- Kontrollzentrum: Betriebszentrale und Aufsicht des teleoperierten Fahrzeugs, Koordination des Teleoperationspersonals.
- Teleoperatorarbeitsplatz: Bedieninstrumente und -oberfläche zur Überwachung, Unterstützung und/oder Steuerung teleoperierter Fahrzeuge.
- Kommunikationsschnittstelle: Datenübermittlung zwischen teleoperiertem Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz (bzw. Kontrollzentrum)
- Fahrzeug: Teleoperiertes Fahrzeug in unterschiedlichen Betriebsmodi (automatisiert, unterstützt, ferngesteuert mit evtl. Zwischenstufen und Transitionen) innerhalb definierter Operational Design Domain (ODD) der automatisierten Fahrzeugfunktion
- Umwelt: Umgebung, in der das teleoperierte Fahrzeug betrieben wird (z.B. Straße, Verkehrsregelung, Umgebungsverkehr, Personen)

Weitere Systemkomponenten können Fahrgäste im teleoperierten Fahrzeug oder Servicepersonal vor Ort sein. Das gesamte System ist in die Gesellschaft eingebettet, die die Rahmenbedingungen für den Teleoperationsbetrieb festlegt (z.B. indem die rechtlichen Rahmenbedingungen definiert werden).

Neben dem teleoperierten Fahrzeug selbst nimmt der Arbeitsplatz der teleoperierenden Person eine zentrale Rolle innerhalb des Teleoperationssystems ein:

- (1) Die Auswahl und Darstellung der Informationen über das automatisierte bzw. teleoperierte Fahrzeug und die Fahrzeugumgebung bestimmen Immersion und Präsenzerleben sowie das mentale Modell und das Situationsbewusstsein der teleoperierenden Person. Mögliche Informationsquellen über das Fahrzeug und die Verkehrsumgebung sind z.B. Kamerabilder und Sensorinformationen. Des Weiteren können aktuelle Charakteristika der Kommunikationsschnittstelle (z.B. Latenz) dargestellt werden. Zusätzlich können eine Reihe von innovativen Ansätzen zur Visualisierung (z.B. prädiktive Displays) und spezifische Assistenzen für die teleoperierende Person (z.B. zur Kompensation der latenzbehafteten Kommunikation zwischen Teleoperatorarbeitsplatz und Fahrzeug) sowie die Verwendung weiterer Feedbackmodalitäten in Betracht gezogen werden.
- (2) An einem entsprechenden Arbeitsplatz unterstützt und steuert das Teleoperationspersonal das Fahrzeug. Die Effektivität (z.B. Fahrperformanz) und Effizienz (z.B. Workload) der Teleoperation hängt dabei von den eingesetzten Bedieninstrumenten (z.B. Joystick vs. Lenkrad) und der Benutzeroberfläche (z.B. Monitoranzahl und -anordnung) ab. Diese müssen zur Art der Fahrzeugsteuerung (direkt, indirekt), zur aktuellen Allokation der Fahraufgaben zwischen teleoperierender Person und Fahrzeug und zur Leistungsfähigkeit der Kommunikationsschnittstelle passen. Die konkrete Ausgestaltung beeinflusst wiederum die Anforderungen an die Auswahl und das Training des Teleoperationspersonals.
- (3) Im Regelfall arbeiten innerhalb eines Kontrollzentrums mehrere teleoperierende Personen parallel um – mittels mehrerer Leitstände – eine Reihe von Fahrzeugen zu steuern bzw. zu unterstützen. Die Arbeitsplätze dieses Personals sind zentraler Bestandteil des Kontrollzentrums. Fragen der Organisation und Aufgabenverteilung des Teleoperationsbetriebs (z.B. Zuordnung des Personals zu den jeweils teleoperierten Fahrzeugen) sind nicht ohne einen Bezug auf den konkreten Teleoperatorarbeitsplatz zu beantworten. An dieser Stelle sind auch ergonomische Aspekte der Arbeitsplatzgestaltung und Fragen bzgl. erlaubter Bediendauern und Nebentätigkeiten (in Abhängigkeit von der aktuellen Fahraufgabe) relevant.

Insgesamt bestimmt der Arbeitsplatz des Teleoperationspersonals auch das Bild, das die Gesellschaft von einer zukünftigen Mobilität unter Einbezug von Teleoperation hat. Er beeinflusst damit indirekt die gesellschaftliche Akzeptanz teleoperierter Mobilitätslösungen und die Wahrnehmung des Berufsbilds einer teleoperierenden Person in der Öffentlichkeit.

1.3 Forschungsbedarf

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Veröffentlichungen im Bereich des teleoperierten Fahrens deutlich angestiegen. Eine Suche nach den Begriffen („*vehicle*“ & „*remote driving*“) und („*vehicle*“ & „*teleoperated driving*“) in Google Scholar ergab für die letzten Jahre einen Anstieg von ca. 50 jährlichen Veröffentlichungen bis 2016 zu deutlich mehr als 500 veröffentlichten Artikeln im Jahr 2022. Aus dem Anstieg der Anzahl an Veröffentlichungen kann auf deutlich gesteigerte Forschungsaktivitäten geschlossen werden.

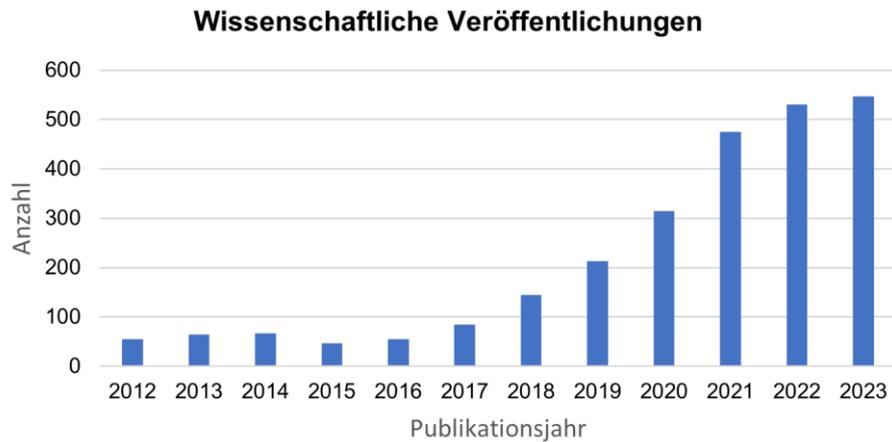


Bild 1: Gefundene Artikel in Google Scholar (<https://scholar.google.com>) mit den Suchkriterien („vehicle“ & „remote driving“) und („vehicle“ & „teleoperated driving“); Stand von Januar 2024.

Wenn man Artikel ausblendet, die technische Details behandeln (z.B. zu Streaming und Videokompression, Klassifikation von Verkehrssituationen oder Security; z.B. Chucholowski et al., 2014; Schimpe et al., 2021), gesellschaftliche Aspekte (Akzeptanz, Veränderung der Mobilität durch Teleoperation) oder die Wirtschaftlichkeit teleoperierter Anwendungsfälle betreffen (D’Orey et al. 2016; Goodall, 2020; Klink, 2021), bleibt eine Vielzahl von Forschungsfragen, die in der Literatur zum teleoperierten Fahren bislang behandelt oder als zukünftige Untersuchungsgegenstände genannt werden. Diese betreffen z.B. das Zusammenspiel von teleoperierender Person und automatisierter Fahrfunktion sowie die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Weitere Forschungsfragen behandeln die Anforderungen an Teleoperationspersonal und den entsprechenden Arbeitsplatz sowie die Gestaltung der Rollen- und Aufgabenverteilung in Kontrollzentren.

Bevor eine breitere Einführung teleoperierter Steuerungskonzepte im öffentlichen Straßenverkehr möglich ist, ist zukünftig die Gestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes und seine Einbettung in das System-of-Systems der Teleoperation intensiv zu untersuchen. Dazu ist eine Forschungsumgebung nötig, die die zentrale Rolle des Teleoperatorarbeitsplatzes untersuchbar macht, indem in Studien die verschiedenen Einflussgrößen kontrolliert variiert werden können. Diese zu untersuchenden Einflussgrößen umfassen insbesondere

- (1) die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz (z.B. Latenz, Jitter),
- (2) die Hardware (Monitore, Bedieninstrumente) des Teleoperatorarbeitsplatzes,
- (3) die Visualisierung inkl. GUI und Konfigurationsmöglichkeit,
- (4) die Umsetzung weiterer Feedbackmodalitäten,
- (5) die Art der Teleoperation inkl. verschiedener Aufteilungen der Fahraufgabe zwischen teleoperierender Person, automatisierter Fahrfunktion und ggf. Fahrpersonal vor Ort inkl. der Reallokation der Fahraufgabe einschließlich Transitionen und Übernahmeaufforderungen,

- (6) die Darstellung verschiedener Fahrumgebungen (z.B. Autobahn, Stadt) und Anwendungsszenarien (z.B. Lkw, autonomer ÖPNV-Shuttle),
- (7) die Simulation von Ereignissen und Störungen, die ein Eingreifen des Teleoperationspersonals erfordern und
- (8) die Einbindung realer Fahrplattformen ebenso wie die Teleoperation virtueller Fahrzeuge.

1.4 Fragestellung und Struktur des Berichts

In Zusammenhang mit der teleoperierten Fahrzeugsteuerung stellt sich somit die Frage, wie ein Teleoperatorarbeitsplatz aufgebaut und gestaltet sein sollte, um eine angemessene Teleoperation zu ermöglichen. Gleichzeitig ergeben sich aus dem Setting der Teleoperation bestimmte Faktoren, die die Fahrperformanz des Teleoperationspersonals direkt wie auch indirekt – z.B. über die kognitive Beanspruchung oder das Situationsbewusstsein der teleoperierenden Person – beeinflussen können.

Dieser Forschungsbericht hat zum einen das Ziel,

- (1) begründete Mindestanforderungen an die Spezifikation relevanter Gestaltungsaspekte von Teleoperatorarbeitsplätzen auf Basis des aktuellen Stands von Forschung und Technik abzuleiten,

und möchte zum anderen

- (2) Anforderungen an experimentelle Leitstände, die als Forschungswerkzeug zur Beantwortung offener Forschungsfragen eingesetzt werden können, spezifizieren.

Der Bericht hat folgende Struktur:

In Kapitel 2 wird auf den aktuellen Forschungsstand bzgl. möglicher den Teleoperatorarbeitsplatz betreffender Einflussgrößen auf die sichere und effiziente Teleoperation eingegangen. Dabei werden insbesondere die Faktoren Latenz, Gestaltung der Bedienelemente, Videoqualität, innovative Displaytechnologien, Darstellung zusätzlicher Informationen und Verwendung zusätzlicher Darstellungsmodalitäten sowie Modus der Teleoperation näher betrachtet. Anschließend werden kompensatorische Maßnahmen zur Reduktion der negativen Auswirkungen der Teleoperation auf Workload, Situationsbewusstsein und Fahrperformanz diskutiert.

Kapitel 3 beschreibt bestehende Teleoperatorarbeitsplätze und stellt Kategorisierungsaspekte für Teleoperatorarbeitsplätze vor.

In Kapitel 4 wird das Konzept eines ideal-typischen Leitstands für Telefahren und Teleassistenz erarbeitet. Die Basis bildet eine Definition von Mindestanforderungen an den Aufbau des Leitstands. Dazu gehören Steuerungseinrichtungen, Anzeigen und Bildschirme, Kommunikationstechnologien und weitere teleoperationsspezifische Anzeigen. Das Ergebnis ist ein Katalog von Mindestanforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz.

Die experimentalpsychologischen Anforderungen an einen Leitstand als Forschungswerkzeug zur Untersuchung von Forschungsfragen zur Mensch-Maschine-Interaktion bei der teleoperierten Fahrzeugsteuerung stehen im Fokus von Kapitel 5. Das Konzept beinhaltet insbesondere, dass die relevanten unabhängigen Variablen flexibel und ohne größeren

Aufwand variiert werden können und verschiedenste Messparameter erhoben werden können.

Anschließend werden in Kapitel 6 die technischen Anforderungen an einen experimentellen Leitstand vorgestellt. Dies beinhaltet die Aspekte Hardware und Aufbau des Leitstands und des Versuchsleiterplatzes, Software- und Bedienkonzept, technische Schnittstelle zwischen Leitstand und Fahrzeug sowie modulare Fahrplattform.

Danach wird in Kapitel 7 der prototypische Aufbau eines experimentellen Leitstands für das Telefahren dargestellt. Der umgesetzte Leitstand erlaubt das Telefahren eines virtuellen Fahrzeugs in der Fahrsimulation.

Abschließend wird in Kapitel 8 Bilanz gezogen und ein Ausblick gegeben.

2 Literaturanalyse zur Mensch-Maschine-Interaktion bei der Teleoperation von Fahrzeugen

2.1 Anforderungen, Workload und Situationsbewusstsein

Die zentrale Anforderung an fahrzeugführende Personen, egal ob im Fahrzeug präsent oder per Teleoperation, ist, eine sichere Fahrt des Fahrzeugs sowohl beim Telefahren als auch bei Teleassistenz zu gewährleisten. Beim Telefahren muss die Fahrperformanz von ähnlich hoch sein wie bei Steuerung des Fahrzeugs durch eine im Fahrzeug präsen- te Person. Dazu ist es notwendig, dass Teleoperationspersonal einer angemessenen Arbeitsbe- lastung bzw. Beanspruchung (sog. Workload) ausgesetzt ist, wobei vor allem eine Überfor- derung im Sinne einer zu hohen Beanspruchung vermieden werden muss (Kettwich et al., 2021; Schrank & Kettwich, 2021). Umgekehrt kann auch ein zu geringer Workload die Fahrleistung negativ beeinflussen, z.B. durch nachlassende Aufmerksamkeit. Aufgrund der Tatsache, dass teleoperierende Personen per Definition nicht physisch im Fahrzeug prä- sent sind, sondern eine indirekte, durch Video- und andere Kanäle vermittelte Darstellung der Fahrsituation erleben, unterliegt ihr Workload einer Reihe spezifischer Einflussfakto- ren.

Einen wesentlichen Einflussfaktor hinsichtlich des Workloads stellt die Verzögerung im In- formationsaustausch zwischen Teleoperationspersonal und Fahrzeug dar, die sog. Latenz (Chen et al., 2007; Lu et al., 2019; Neumeier et al., 2019; Tang, 2015). Latenzen entstehen beim teleoperierten Betrieb notwendigerweise, da Signale zwischen Teleoperatorarbeits- platz und Fahrzeug übertragen werden müssen. Dies beinhaltet beispielsweise Informatio- nen über den Zustand des Fahrzeugs und der Fahrsituation sowie Eingaben der teleoperie- renden Person. Dabei unterliegt die Übertragungsgeschwindigkeit physikalisch wie tech- nisch bedingten Grenzen (Kang et al., 2018). Hinsichtlich des Einflusses auf den Workload von teleoperierenden Personen zeigen Untersuchungen, dass höhere und variable Laten- zen mit einem höheren Workload einhergehen als niedrige und konstante Latenzen (Lu et al., 2019; Neumeier et al., 2019). Dabei erhöhen kleine, variable Latenzen den Workload stärker als große, konstante Latenzen. Insbesondere die Variabilität von Latenzen scheint also einen kritischen Einflussfaktor darzustellen. Diese Ergebnisse stehen auch im Einklang mit Studien zum Einfluss von Latenzen aus dem Bereich der Robotik (Chen et al., 2007).

Daneben wirkt sich auch die Gestaltung der Bedienelemente auf den Workload des Tele- operationspersonals aus. In diesem Zusammenhang untersuchten Adamides et al. (2017) den Einfluss zweier Steuereingabegeräte – einer herkömmlichen PC-Tastatur und eines Gamepads – zur Steuerung eines landwirtschaftlichen Sprühroboters. Die Ergebnisse wei- sen darauf hin, dass die Steuerung per PC-Tastatur zu einem geringeren Workload führt als die Steuerung per Gamepad. Dagegen fanden Bodell & Gullikson (2016) heraus, dass

die Verwendung von Lenkrad und Pedalerie beim Telefahren eines simulierten Lastkraftwagens (Lkw) zu einer konservativeren und damit präziseren Steuerung des Fahrzeugs führt als die Verwendung eines Gamepads. Die Autoren führen diesen Befund auf eine höhere Passung zwischen den Bedienelementen und der durchzuführenden Fahraufgabe zurück und argumentieren unter diesem Gesichtspunkt im Falle der direkten, teleoperierten Steuerung (d.h. Telefahren) für eine Gestaltung von Bedienelementen, die sich am Cockpit realer Fahrzeuge (Lenkrad, Pedalerie) orientiert.

Weiterhin nimmt auch die Videoqualität des zur Anzeige der Fahrsituation verwendeten Videostreams Einfluss auf den Workload des Teleoperationspersonals. Die Frage nach einer ausreichenden Videoqualität, die ein sicheres, teleoperiertes Steuern des Fahrzeugs erlaubt, steht dabei in engem Zusammenhang mit der Latenz: Eine hohe Videoqualität in Form einer hohen Bildrate und -auflösung geht aufgrund der damit verbundenen Datenmenge, die zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz übertragen werden muss, im Regelfall mit einer höheren Latenz einher (Kang et al., 2018). Umgekehrt kann eine Reduktion der Bildrate und -auflösung zur Reduktion von Latenzen negative Effekte auf den Workload des Teleoperationspersonals nach sich ziehen, da dadurch eine größere visuelle Beanspruchung, beispielsweise zur Erkennung von Fußgängern und anderen Verkehrsteilnehmenden, bedingt werden kann. So fanden Georg, Putz & Diermeyer (2020) bei einem Vergleich zweier Videoübertragungsraten (15 Mbit/s vs. 5 Mbit/s) heraus, dass eine Verringerung der Qualität des Videostreams in Situationen mit hohem Kontrast zu einem höheren Workload führt. Im Einklang damit berichteten Versuchspersonen in einer Untersuchung von Bodell & Gullikson (2016) ab einer Bildrate von zehn Bildern pro Sekunde (fps) und weniger von größerer Erschöpfung und mehr notwendiger Konzentration, um ein simuliertes Fahrzeug mit einer ähnlichen Fahrleistung zu steuern als bei höheren Bildraten. Hierbei gaben die Befragten jedoch an, dass sie eine Reduktion der Bildrate gegenüber einer Erhöhung der Latenz hinsichtlich der subjektiv empfundenen Beanspruchung bevorzugen und damit eine geringere Bildqualität zugunsten niedrigerer Latenzen tolerieren würden.

Darüber hinaus bilden auch die verwendeten Bildschirmtechnologien einen Einflussfaktor hinsichtlich des Workloads. Für die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen wurden unterschiedliche Bildschirmkonzepte vorgeschlagen, die neben klassischen PC-Bildschirmen auch die Verwendung von Head-Mounted-Displays (HMD) sowie Virtual-Reality- (VR) und Augmented-Reality- (AR)-Displays empfehlen. Dabei findet sich eine Reihe von Untersuchungen, die den Einfluss derartiger Displays bei der Teleoperation von Fahrzeugen untersuchen. So fanden Adamides et al. (2017) beim Vergleich zweier Anzeigekonzepte (PC-Bildschirm vs. HMD) einen höheren Workload in der HMD- als in der PC-Bildschirmbedingung für die Steuerung eines landwirtschaftlichen Roboters. Die Ergebnisse stehen damit auch im Einklang mit einer Untersuchung verschiedener Anzeigekonzepte für die teleoperierte Bedienung von Kränen (Chi et al., 2012): Die Verfasser verglichen ein herkömmliches Bedienkonzept (Sicht des Bedieners von oben mit mündlichen Anweisungen vom Boden aus) mit einem System mit vier Ansichten (von oben, von links, von rechts, Gesamtansicht) sowie dem Vier-Ansichten-System in Kombination mit einem Augmented-Reality-Display. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung des Vier-Ansichten-Systems mit und ohne AR zu höherem Workload führt als das konventionelle Anzeigekonzept, wobei die zusätzliche AR-Darstellung im Vergleich mit dem Vier-Ansichten-System allein keinen signifikanten Unterschied im Workload verursacht. Dagegen fand Hosseini (2018) beim Vergleich zwischen konventionellen PC-Bildschirmen und einem Mixed-Reality-Dis-

play Hinweise auf eine Reduktion des Workloads durch das verwendete Mixed-Reality-Anzeigekonzept. Im Kontrast dazu fanden Luo et al. (2021) keine generellen Unterschiede hinsichtlich des Workloads zwischen einem Virtual-Reality-Head-Mounted-Display (VR-HMD) und einer klassischen Anzeige auf einem PC-Bildschirm. Beim Vergleich zweier stereoskopischer VR-HMD, die sich darin unterschieden, ob die Veränderung der Kopfposition zu einer Veränderung der Ansicht führte (Head-Tracking) oder nicht (Fixed-Tracking), ergaben sich jedoch Hinweise auf eine Workload reduzierende Wirkung in der Fixed-Tracking-Bedingung, wobei eine Verallgemeinerung der Ergebnisse aufgrund der geringen Stichprobengröße von acht Teilnehmenden schwierig ist. Gleichzeitig zeigen Untersuchungen in Fahrsimulatoren und zur teleoperierten Steuerung von Fahrzeugen, dass der Einsatz von HMD, VR- und AR-Displays das Auftreten von Bewegungskrankheit begünstigen und sich negativ auf Wohlbefinden und Workload auswirken kann (Oving & van Erp, 2001; Suomela, 2001). Insgesamt kann die Frage nach dem Einfluss der zur Visualisierung der Fahrsituation verwendeten Bildschirmtechnologien auf den Workload der Teleoperierenden aufgrund der inkonsistenten Befunde derzeit nicht eindeutig beantwortet werden.

Eng im Zusammenhang mit verwendeten Displaytechnologien steht auch die Frage nach dem Einfluss der Darstellung zusätzlicher Informationen und der dafür verwendeten Darstellungsmodalitäten. Um es dem Teleoperationspersonal zu ermöglichen, einen für die Teleoperation des Fahrzeugs angemessenen Einblick in die Fahrsituation zu erhalten, wird häufig die Darstellung zusätzlicher Informationen, wie beispielsweise das Anzeigen des Abstands zu einem Vorderfahrzeug, Kartendarstellungen zur Ego-Position des Fahrzeugs, zusätzliche Perspektiven (z.B. Vogelperspektive) oder die Darstellung der aktuellen Latenz (Bodell & Gullikson, 2016; Mutzenich et al., 2021), vorgeschlagen. Dabei kann die zusätzliche Informationslast je nach verwendeter Feedbackmodalität auch zu einer unerwünschten Erhöhung des Workloads führen. So zeigte eine Untersuchung von Kallionimie et al. (2021) über die Auswirkungen von zusätzlichen visuellen, haptischen, auditiven sowie kombinierten Warnungen zur Rückmeldung von Witterungsverhältnissen (nasse Fahrbahn), dass rein auditive im Vergleich mit rein visuellen bzw. rein haptischen Warnungen eine Erhöhung des Workloads bedingen können, wobei sich signifikante Unterschiede nur für die Subskala „Frustration“ fanden. Umgekehrt kann die Bereitstellung zusätzlicher Informationen auch zu einer Reduktion des Workloads führen. Luo et al. (2021) untersuchten im Zusammenhang damit die Anzeige von Abstandsinformationen durch visuell-periphere (LED-Streifen) und vibrotaktile (vibrationsbasiertes Feedback am Hinterkopf) Hinweisreize in Verbindung mit einer VR-HMD-Anzeige: Beide Darstellungsmodalitäten führten zu einer signifikanten Reduktion des subjektiven Workloads im Vergleich zur Baselinefahrt ohne eine derartige Darstellung, wobei sich die Auswirkungen visuell-peripherer Hinweisreize auf mehr Subskalen zeigte als bei vibrotaktile Vermittlung. Insgesamt erscheint die Antwort auf die Frage nach dem Einfluss von zusätzlichen Informationen und gewählten Darstellungsmodalitäten auf den Workload bei der Teleoperation nicht abschließend beantwortet.

Schließlich ist auch der Modus der Teleoperation als Einflussfaktor auf den Workload von teleoperierenden Personen zu betrachten. Dabei unterscheidet man die Modi der direkten teleoperierten (Telefahren bzw. Remote Driving) und der indirekten teleoperierten Fahrzeugsteuerung (Teleassistenz bzw. Remote Assistance): Während die teleoperierende die Fahraufgabe vollständig übernimmt, werden bei der Teleassistenz je nach genauer Ausgestaltung nur bestimmte Teilaspekte, wie beispielsweise die Auswahl eines geeigneten Fahrstreifens oder das Bestätigen vom Fahrzeug vorgeschlagener Trajektorien, an das Teleoperationspersonal delegiert, was zu Unterschieden in der Beanspruchung führen kann.

So argumentieren Hosseini & Lienkamp (2015), dass das Telefahren im Vergleich zur Teleassistenz generell einen höheren Workload bedinge und bei ohnehin stark beanspruchenden Szenarien, wie Fahren im Stadtverkehr, grundsätzlich der Einsatz von Teleassistenz zu empfehlen sei. Gleichzeitig besitzt die Teleassistenz das Potenzial, die negativen Auswirkungen auch größerer Latenzen zu verringern. So zeigte sich im Rahmen einer Simulator- und Realfahrstudie zur teleoperierten Steuerung von Fahrzeugen, in der das Telefahren mit einer trajektorienbasierten Teleassistenz verglichen wurde, dass das System in der Teleassistenz-Bedingung auch bei Latenzen von bis zu 600 ms in der Lage war, die Spurführungsaufgabe zu erfüllen (Gnatzig, 2015). Die Ergebnisse unterliegen jedoch der Einschränkung, dass in der Untersuchung Geschwindigkeiten von maximal 35 km/h gefahren wurden. Aufgrund der bis dato geringen Anzahl an empirischen Studien, die einen unmittelbaren Vergleich verschiedener Teleoperationsmodi zum Gegenstand haben, erscheinen generelle Aussagen über deren Wirkung auf den Workload beim Teleoperationspersonal schwierig. Zukünftige Studien sollten dabei insbesondere die Wirkung unterschiedlicher Modi auf den Workload von teleoperierenden Personen in Abhängigkeit unterschiedlich beanspruchender Fahrscenarien genauer untersuchen.

Neben dem Sicherstellen eines für die Fahrzeugführung angemessenen Workloads ist eine zentrale Anforderung der Teleoperation an das Teleoperationspersonal der Aufbau eines angemessenen Situationsbewusstseins. Das Situationsbewusstsein stellt in diesem Zusammenhang die mentale Repräsentation der aktuellen Fahrsituation durch die fahzeugführende bzw. teleoperierende Person dar. Nach Endsley (1988) umfasst das Situationsbewusstsein drei Ebenen: (1) die Wahrnehmung von Elementen innerhalb einer dynamischen Umgebung (Perception), (2) das Verstehen der Bedeutung dieser Elemente (Comprehension) und (3) die Antizipation (Projection) derer Zustände in der nahen Zukunft. Demnach ist ein Mindestmaß an Situationsbewusstsein bezüglich der aktuellen Fahrsituation eine wesentliche Voraussetzung für die Auswahl und Ausführung adäquater Steuereingaben und damit letztlich für eine angemessene Fahrperformanz. Darüber hinaus bedingt ein größeres Situationsbewusstsein eine höhere Telepräsenz, d.h. sie trägt dazu bei, dass die teleoperierende Person das Gefühl hat, sich tatsächlich physisch wie psychisch in der aktuellen Fahrsituation zu befinden (Hosseini & Lienkamp, 2016; Tang, 2015). Im Vergleich mit der Steuerung eines Fahrzeugs durch eine sich unmittelbar im Fahrzeug befindende Person erschwert die Teleoperation den Aufbau von Situationsbewusstsein: Die Teleoperation bedingt ein nicht unmittelbares, sondern ein durch Video- und andere Kanäle vermitteltes Erleben der Fahrsituation. Teleoperierende Personen erhalten dadurch bestimmte visuelle, auditive und vestibulär-propriozeptive Informationen nicht oder lediglich in reduzierter Form, was zu fehlendem oder defizitärem Situationsbewusstsein führen kann (Endsley et al., 2003; Hosseini, 2018; Mutzenich et al., 2021; Tang, 2015). Beispielsweise hängt die Wahrnehmung der gefahrenen Geschwindigkeit und Beschleunigung stark von visuellen, auditiven und vestibulären Informationen ab. Ein Fehlen von Informationen aus einem oder mehreren dieser Modalitäten kann zu einer Fehleinschätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit (Über- oder Unterschätzung) führen und folglich das Situationsbewusstsein reduzieren (Tang, 2015). Der dadurch erschwerte Aufbau eines angemessenen Situationsbewusstseins erscheint besonders kritisch, wenn Teleoperation als Rückfallebene für automatisierte Fahrzeuge eingesetzt wird (Mutzenich et al., 2021): In diesem Fall, in dem das Teleoperationspersonal beim Erreichen bestimmter Systemgrenzen bzw. in Situationen, die das automatisierte Fahrzeug allein nicht auflösen kann, zur Übernahme angefordert wird, liegen der teleoperierenden Person vermutlich keine Informationen vor, die die Fahrsituation zeitlich vor der Übernahmeaufforderung betreffen. Mutzenich et al.

(2021) argumentieren, dass die Teleoperation unter diesem Gesichtspunkt generell als Grenzfall der Übernahme der Fahraufgabe durch eine im Fahrzeug befindliche Person aufgefasst werden kann. Dabei unterscheiden sich die beiden Anwendungsfälle qualitativ jedoch dadurch, dass teleoperierende anders als im Fahrzeug präsen- te Personen bei Übernahme der Fahraufgabe keine mentale Repräsentation der Fahrsituation besitzen können, wenn sie vor der Übernahmeaufforderung das Fahrgeschehen nicht bereits beobachtet haben. Entsprechend ist unter dieser Voraussetzung ein impliziter Aufbau wie bei automatisierter (Mit-)Fahrt im Fahrzeug nicht möglich. Empirische Ergebnisse aus Untersuchungen zur für die Übernahme der Fahrzeugsteuerung aus automatisierter Fahrt notwendigen Zeitdauer für im Fahrzeug präsen- te Personen bei Level-4- oder Level-5-Automation könnten demnach als Untergrenzen für Übernahmezeiten beim teleoperierten Fahren angesehen werden. Während Studien zur Übernahme aus Level-3-Automation eine notwendige Übernahmedauer von 3-8 s nahelegen (Mutzenich et al., 2021), finden sich bis dato keine empirisch bestätigten Grenzwerte für höhere Automationsstufen. Aufgrund des im Vergleich zum automatisierten Fahren mit physisch präsen- ter Person im Fahrzeug potenziellen impliziten Aufbaus des Situationsbewusstseins sind im Teleoperationssetting aus theoretisch-logischen Überlegungen höhere Übernahmezeiten zu erwarten. Demnach sollten Teleoperatorarbeitsplätze derart gestaltet werden, dass sie einen schnellen und gleichzeitig möglichst umfassenden Aufbau des Situationsbewusstseins begünstigen. Dabei existieren unterschiedliche Faktoren, die sich aus dem speziellen Setting der Teleoperation ergeben und den Aufbau und die Qualität des Situationsbewusstseins beim Teleoperationspersonal beeinflussen können. Georg, Putz & Diermeyer (2020) fanden in einer Untersuchung zum Vergleich zweier Videoübertragungsraten (15 Mbit/s vs. 5 Mbit/s) heraus, dass eine höhere Übertragungsrate und damit eine höhere Videoqualität zu einem besseren Situationsbewusstsein führen, wobei sich insbesondere die Einschätzung der eigenen Querposition und die Vorhersage der zukünftigen Situation (Perception; Ebene 3 des Situationsbewusstseins) verbesserte. Daneben zeigte die in der Studie vorgenommene Variation der Anzeige (Monitore mit getrennter Sicht vs. integrierte Sicht vs. HMD), dass das HMD im Vergleich mit den beiden anderen Displaykonzepten ein besseres Situationsbewusstsein bedingt, wobei die Verfasser argumentieren, dass dieser Effekt durch eine erhöhte Telepräsenz und Immersion vermittelt werde. Die Ergebnisse stehen damit auch im Einklang mit früheren Untersuchungen (Hosseini, 2018). Daneben nimmt auch die zur Anzeige bestimmter Informationen gewählte Modalität einen Einfluss auf das Situationsbewusstsein. So zeigte eine Untersuchung zum Einfluss von zusätzlichem visuellem, haptischem und auditivem Feedback über vorliegende Witterungsverhältnisse (nasse Fahrbahn), dass eine Kombination aller drei Modalitäten am besten geeignet ist, um das Situationsbewusstsein zu erhöhen (Kallionimie et al., 2021). Gleichzeitig gaben die Versuchspersonen aber auch an, dass ihnen Feedback bezüglich einzelner Aspekte des Situationsbewusstseins, wie propriozeptive Rückmeldung der gefahrenen Geschwindigkeit, fehlten und das Präsenzerleben im Vergleich zu Fahrten in einem realen Fahrzeug dadurch reduziert würde, was auch als Hinweis darauf zu werten ist, dass die Passung zwischen darzustellender Information und Modalität auch für den Aufbau des Situationsbewusstseins relevant sein könnte. Schließlich wird das Situationsbewusstsein auch durch die Menge an zusätzlich dargestellten Informationen über die Fahrsituation, wie die Visualisierung bestimmter Sensordaten, beeinflusst (Bodell & Gullikson, 2016; Mutzenich et al., 2021), wobei derartige Anzeigekonzepte meist vor dem Hintergrund kompensatorischer Maßnahmen untersucht wurden. Dabei birgt die Darstellung zusätzlicher Informationen, insbesondere bei visueller Präsentation, stets die Gefahr einer unerwünschten Erhöhung des Workloads, und zwar auch

dann, wenn dadurch das Situationsbewusstsein der teleoperierenden Personen potenziell erhöht wird (Luo, Wang, Shi et al., 2021; Matts & Sterner, 2020; Mutzenich et al., 2021).

2.2 Leistungsgrenzen und Fahrperformanz

Für eine sichere Teleoperation von Fahrzeugen muss sichergestellt werden, dass die Fahrperformanz von teleoperierenden Personen im Vergleich mit der manuellen Steuerung durch eine im Fahrzeug befindliche Person nicht wesentlich reduziert wird. Bisherige Untersuchungen fanden dabei eine Reihe von Einflussfaktoren, die sich aus dem speziellen Setting der Teleoperation ergeben. Überdies konnten in diesem Rahmen Grenzwerte für einige dieser Faktoren bestimmt werden. Ober- bzw. unterhalb dieser Grenzen sind die negativen Auswirkungen auf die Fahrperformanz derart groß, dass eine sichere Teleoperation nicht mehr gewährleistet werden kann.

Einen wesentlichen Einflussfaktor stellt die Latenz dar. Im Kontext von Human-Factors-Untersuchungen der Teleoperation bezeichnet der Begriff Latenz die Gesamtzeit, die von der Tätigkeit von Fahreingaben, über deren Übertragung vom Teleoperatorarbeitsplatz an das Fahrzeug, deren Umsetzung am Fahrzeug bis zur Rückübertragung und Darstellung der Sensorinformationen am Teleoperatorarbeitsplatz notwendig ist (sog. Gesamtlatenz bzw. Round-Trip-Time). Aus Sicht von teleoperierenden Personen stellt sie somit die Gesamtverzögerung zwischen einer Eingabe und der Darstellung der daraus resultierenden Änderung der Fahrsituation am Teleoperatorarbeitsplatz dar. Bisherige, empirische Arbeiten zum Einfluss von Latenz auf die Teleoperation von Fahrzeugen betrachten die Gesamtlatenz als Einflussfaktor ohne deren Aufteilung in die Latenz in der Übertragung vom Teleoperatorarbeitsplatz zum Fahrzeug und die Latenz in der Übertragung vom Fahrzeug an den Teleoperatorarbeitsplatz zu berücksichtigen¹. Hierbei verringern höhere Latenzen die Fahrperformanz stärker als kleine Latenzen (Bodell & Gullikson, 2016; Lu et al., 2019; Neumeier et al., 2019; Pongrac, 2011; Tang, 2015), wobei Latenz und Leistungseinbußen keinen rein linearen Zusammenhang aufweisen: Während Latenzen bereits ab einer Größe von 10-20 ms wahrgenommen werden, zeigen sich erste negative Auswirkungen auf die Fahrperformanz erst ab einer Höhe von 170 ms (Tang, 2015). Konstante Latenzen zwischen 0 und 170 ms führen demnach nicht zu Leistungseinbußen beim teleoperierten Fahren. Nach Pongrac (2011), die die Aufgabenperformanz beim teleoperierten Steuern eines Roboters untersuchte, nimmt die Aufgabenleistung dabei für Latenzen zwischen 170 ms und 500 ms quadratisch ab, während für Latenzen über 500 ms ein linearer Verlauf zu beobachten ist. Empirische Untersuchungen, inwieweit sich dieser Zusammenhang auch auf das teleoperierte Fahren übertragen lässt, stehen derzeit noch aus.

Untersuchungen zum teleoperierten Fahren weisen überdies auch auf eine qualitative Änderung bezüglich des Steuerungsverhaltens von teleoperierenden Personen hin: Ab einer Latenz von ca. 300 ms beginnen Teleoperierende nach einer Steuereingabe die Wirkung der selbigen abzuwarten, bevor sie eine erneute Eingabe tätigen, was als sog. Move-and-Wait-Verhalten bezeichnet wird (Bodell & Gullikson, 2016; Neumeier et al., 2019; Tang,

¹ In der angeführten Arbeit von Neumeier et al. (2019) findet sich zwar die Unterscheidung der Latenzen in der Datenübertragung in beide Richtungen, für die untersuchten Latenzausprägungen wurde aber jeweils eine symmetrische Aufteilung auf Hin- (vom Teleoperatorarbeitsplatz zum Fahrzeug) und Rücklatenz (vom Fahrzeug zum Teleoperatorarbeitsplatz) gewählt.

2015). Darüber hinaus geben Bodell & Gullikson (2016) eine empirisch ermittelte Obergrenze für Latenzen beim teleoperierten Fahren an: In einer Untersuchung zum Einfluss von Latenzen auf die Fahrleistung beim teleoperierten Steuern eines simulierten Lastkraftwagens war bei einer Latenz von mehr als einer Sekunde keine der teilnehmenden Personen in der Lage, den Telefahr-Testparcours zu beenden. Auf Basis dieser Befunde argumentieren Neumeier et al. (2019) im Hinblick auf das Telefahren, dass die Latenz unterhalb von 300 ms liegen muss. Dagegen geben Gnatzig, Chucholowski & Lienkamp (2013) an, dass auch bei Latenzen von 550-600 ms ein sicheres, teleoperiertes Führen des Fahrzeugs möglich ist, wobei die Ergebnisse auf Basis der zugrundeliegenden Realfahrzeugstudie nur für Höchstgeschwindigkeiten bis 30 km/h gelten und über diese Geschwindigkeitsgrenze hinaus nicht verallgemeinerbar sind. Im Gegensatz dazu fand Gnatzig (2015) in einer Simulator- und Realfahrzeugstudie zum Einfluss von Latenz und Steuerungsmodus, dass bei der Teleassistenz (Vorgabe von Fahrtrajektorien) Latenzen bis 600 ms kompensiert werden können, während das Telefahren in diesem Latenzbereich zu sicherheitskritischen Situationen aufgrund höherer, gefahrener Geschwindigkeiten führte. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass nicht nur die absolute Höhe der Latenz, sondern auch deren Variabilität, der sog. Jitter, die Performanz beeinflusst (Neumeier et al., 2019; Tang, 2015). Dabei führen variable Latenzen zu stärkeren Einbußen als konstante Latenzen, wobei Jitter und Höhe der Latenzen miteinander wechselwirken: Große, konstante Latenzen wirken sich weniger stark auf die Performanz aus als kleine, variable. Insgesamt kann der negative Einfluss von Latenzen auf die Leistung von teleoperierenden Personen als empirisch gut gesichert bewertet werden, wobei die Latenz im Falle des Telefahrens generell klein, konstant und nicht größer als 300 ms sein sollte. Der genannte Grenzwert unterliegt dabei der Einschränkung, dass in den zugrundeliegenden Studien nur selten Geschwindigkeiten von 35 km/h überschritten wurden. Überdies erscheinen niedrigere Latenzgrenzen für bestimmte Szenarien (bspw. Fahren im Stadtverkehr) notwendig. Schließlich lässt sich die Fragen, inwieweit höhere Latenzen bei Teleassistenz tolerierbar sind, auf Grundlage des aktuellen Wissensstands nicht abschließend beantworten.

Des Weiteren wird die Fahrperformanz bei Teleoperation durch die Gestaltung der Bedienelemente beeinflusst. Adamides et al. (2017) verglichen die Fahrperformanz bei direkter Steuerung eines landwirtschaftlichen Roboters mittels PC-Tastatur und Gamepad. Die Ergebnisse zeigten eine höhere Performanz (schnellere Aufgabenerledigung) bei Verwendung der PC-Tastatur im Vergleich mit der Gamepadsteuerung. Einen ähnlichen Befund lieferte eine Studie zum Telefahren eines simulierten Lkws, in dem die Steuerung per Lenkrad und Fahrpedal zu einer konservativeren und letztlich präziseren Fahrzeugsteuerung führte als die Steuerung per Joystick (Bodell & Gullikson, 2016). Die Ergebnisse stützen damit die Empfehlung, Teleoperatorarbeitsplätze für das Telefahren hinsichtlich der Bedienelemente möglichst wie das Cockpit von Realfahrzeugen zu gestalten (Graf, Palleis et al., 2020) und damit einen Aufbau ähnlich dem von (statischen) Fahrsimulatoren zu verwenden. Für die Teleassistenz empfehlen Graf, Palleis & Hussmann (2020) dagegen die Verwendung von touch- und gestenbasierten Bedienelementen, bspw. für das Einzeichnen und Auswählen von Fahrtrajektorien oder das Bestätigen bestimmter Fahrmanöver, die das Fahrzeug im Nachgang selbständig ausführt, wobei die Anzahl an empirischen Studien zum Einsatz von Teleassistenz in der Teleoperation generell als gering bewertet werden muss. Hinzu kommt, dass die Bandbreite an Teleassistenz-Konzepten hinsichtlich der Aufteilung der Fahraufgabe zwischen teleoperierender Person und Fahrzeug sehr groß erscheint, was eine generelle Empfehlung von Bedienelementen erschwert.

Daneben nimmt auch die Videoqualität für die Übertragung der Fahrsituation an das Teleoperationspersonal einen Einfluss auf dessen Fahrperformanz. Wichtige Größen sind dabei die Bildwiederholfrequenz, die Bildrate, die Auflösung und die Bildgröße. Je höher die Videoqualität ist, desto größer ist die zu übertragende Datenmenge, was die wiederum eine Erhöhung der Latenz bedingen kann (Kang et al., 2018). Umgekehrt kann eine Reduktion der Datenmenge durch eine Reduktion der Videoqualität zu einer Verringerung der Latenz führen. Dabei weisen Untersuchungen aus dem Bereich der Robotik darauf hin, dass eine Reduktion der Videoqualität sich negativ auf die Leistung von Teleoperierenden auswirkt (Chen et al., 2007). Diese Befunde stehen dabei im Einklang mit Studien zum teleoperierten Fahren. So fanden Bodell & Gullikson (2016) im Rahmen einer Untersuchung zum Telefahren eines simulierten Lkws heraus, dass die Reduktion der Bildrate mehr Konzentration seitens der Teleoperierenden notwendig macht und die Versuchspersonen schneller erschöpft, wobei eine nennenswerte Einschränkung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugs erst ab einer Bildrate von 10 fps und weniger auftrat. Die Grenze von 10 fps deckt sich mit früheren Untersuchungen aus der Teleoperation in der Robotik (vgl. Chen et al., 2007, für einen detaillierten Überblick). Dagegen zeigte sich in einer Untersuchung von Matts & Sterner (2020), dass höhere Kompressionsraten und damit eine Reduktion der Videoauflösung die Fahrperformanz beim Telefahren tendenziell verringert, wobei sich die Ergebnisse aufgrund der geringen Stichprobe von lediglich drei Versuchspersonen nur schwer verallgemeinern lassen. Insgesamt sollte die Bildrate eine Grenze von 10 fps nicht unterschreiten (auch nicht für kurze Zeit).

Weiterhin nimmt auch die Anzeige zusätzlicher Informationen einen Einfluss auf die Fahrperformanz von teleoperierenden Personen. Die Darstellung zusätzlicher Informationen ist eine häufig genannte Maßnahme, um die negativen Folgen von Teleoperation auf das Situationsbewusstsein und die Fahrperformanz zu reduzieren. Luo et al. (2021) untersuchten den Einfluss der zusätzlichen Darstellung des Abstands zu einem Vorderfahrzeug auf die Fahrperformanz von Teleoperierenden und variierten dabei die Darstellungsmodalität (visuell-peripher vs. vibro-taktil). Dabei zeigte sich, dass die Darstellung der zusätzlichen Abstandsinformation generell zu einer Verbesserung der Fahrperformanz (geringere Anzahl an Kollisionen) im Vergleich zu einer Baselinefahrt führt, wobei die visuell-periphere Darstellung (LED-Streifen) in mehr Situationen eine positive Wirkung zeigte als die vibrotaktile Darbietung (Vibromotoren in frontaler und okzipitaler Kopfregion). Der Befund steht damit auch im Einklang mit einer Fahrsimulatorstudie von Kallionimie et al. (2021), innerhalb der Informationen zu Witterungsverhältnissen (nasse Fahrbahn) in visueller, auditiver, haptischer sowie kombinierter Form dargeboten wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Darstellung in jeder Modalität für sich allein zu einer Erhöhung der Fahrleistung gegenüber der Baselinefahrt führte und die zusätzliche Darbietung der Information damit generell einen positiven Effekt auf die Fahrleistung hat. Die Forschenden erklärten den Befund durch eine vermittelnde Wirkung des Situationsbewusstseins: Die zusätzliche Präsentation der Abstandsinformation führe zu einem verbesserten Situationsbewusstsein, das sich in einer höheren Fahrperformanz niederschläge. Insgesamt scheint die Darstellung zusätzlicher Informationen einen Einfluss auf die Fahrperformanz von Teleoperierenden zu nehmen, wobei sich aufgrund der Ausrichtung der Studien auf kompensierende Maßnahmen insbesondere Leistungssteigernde Effekte zeigen. Gleichzeitig erscheinen weiterführende Untersuchungen zu deren Wirksamkeit mit Blick auf potenziell negative Effekte auf den Workload als sinnvoll.

Schließlich unterliegt die Fahrperformanz potenziell auch dem Einfluss der zur Darstellung der Fahrsituation verwendeten Displaytechnologien. So zeigte eine Untersuchung zum

Vergleich zweier Anzeigekonzepte, eines mit klassischen PC-Bildschirmen und eines mit Mixed-Reality-Konzept (PC-Bildschirme + HMD), dass die Fahrperformanz durch die Verwendung von Mixed-Reality-Konzepten verbessert werden kann (Hosseini, 2018), wobei der Autor die gesteigerte Fahrleistung inhaltlich auf ein durch das HMD erhöhtes Situationsbewusstsein zurückführte. Dagegen fanden Adamides et al. (2017) beim Vergleich von klassischen PC-Displays mit einer Mixed-Reality-Anzeige zur Steuerung eines landwirtschaftlichen Sprühroboters keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Fahrperformanz der teleoperierenden Personen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit einer Simulatorstudie von Georg, Putz & Diermeyer (2020), die ebenfalls keine Hinweise auf einen Einfluss der verwendeten Displaytechnologien (PC-Bildschirme vs. PC-Bildschirme + HMD) ergaben. Ähnliche Resultate lieferte eine Untersuchung von Luo et al. (2021), in der sich keine generellen Unterschiede zwischen der Verwendung klassischer PC-Bildschirme und HMD fanden, wobei das HMD in Verbindung mit einer stereoskopischen Darstellung der Fahrsituation durchaus zu einer signifikanten Verbesserung der Fahrleistung gegenüber der Anzeige mit herkömmlichen 2D-Displays führte. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchspersonen ($n = 8$) und methodischer Einschränkungen (nicht vollständig gekreuzter Versuchsplan) sind jedoch sowohl die Interpretation als auch die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse infrage zu stellen. Daneben wird die Bewertung der insgesamt inkonsistenten Befunde durch eine Konfundierung des Faktors Anzeigekonzept mit der Sichtfeldgröße in der Untersuchung von Hosseini (2018) erschwert: Im Vergleich zur alleinigen Anzeige mittels PC-Bildschirm beinhaltete das Mixed-Reality-Konzept ein 360°-Sichtfeld, das durch die Visualisierung von LIDAR-Daten im HMD generiert wird, und lieferte damit insbesondere eine Visualisierung von Teilaspekten der Fahrsituation, die die konventionelle Darstellung mittels PC-Bildschirmen allein nicht enthielt. Demnach könnte die Erhöhung der Fahrperformanz auf das größere Sichtfeld statt auf die Anzeige per Mixed-Reality-Display zurückzuführen sein. Zudem erfolgte die Evaluation der beiden Anzeigekonzepte auf Basis einer Stichprobengröße von lediglich vier Versuchspersonen, rein deskriptiv und insbesondere ohne inferenzstatistische Absicherung. Aufgrund der insgesamt inkonsistenten Befundlage und der genannten methodischen Einschränkungen erscheint eine abschließende Bewertung hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Displaytechnologien auf die Fahrperformanz auf Basis der aktuellen Studienlage nicht möglich. In dazu notwendigen, zukünftigen Studien sollte insbesondere auf eine klare Trennung zwischen verwendeter Bildschirmtechnologie und der Darstellung zusätzlicher Informationen geachtet werden.

2.3 Unterstützung und Kompensation

In der Literatur zur Teleoperation von Fahrzeugen werden unterschiedliche, kompensatorische Maßnahmen genannt, die die negativen Auswirkungen auf den Workload und die Fahrperformanz von Teleoperationspersonal reduzieren sollen und deren Wirksamkeit zum Teil in empirischen Studien untersucht wurde. Tab. 2 bietet einen Überblick über die verschiedenen, diskutierten Maßnahmen und die entsprechenden Befunde zur Wirksamkeit.

Prädiktive Displays zählen zu den am häufigsten genannten Kompensationsmaßnahmen und dienen insbesondere dem Zweck, latenzbedingte, negative Effekte auf Workload und Fahrperformanz von Teleoperationspersonal zu verringern (Chen et al., 2007). Hierzu werden der teleoperierenden Person je nach genauer Ausgestaltung beispielsweise die Auswirkungen der eigenen Steuereingaben, wie die prädierte Änderung der Position des Ego-fahrzeugs, oder die vorausberechneten Positionen anderer Verkehrsteilnehmender in

der Fahrszene dargestellt. Durch die prädizierten Inhalte soll die Verzögerung in der Darstellung der Fahrsituation und infolge dessen deren negative Auswirkungen auf die Fahrleistung kompensiert werden. Die empirische Studienlage zur Wirksamkeit derartiger prädiktiver Anzeigen belegt positive Effekte auf die Teleoperation. So zeigte eine Simulator- und Realfahrzeugstudie von Chucholowski (2015), dass eine prädiktive Anzeige hinsichtlich der zukünftigen Position des Ego-Fahrzeugs und der anderer Verkehrsteilnehmer zu einer besseren Fahrleistung führte. Insbesondere waren die Versuchspersonen beim Fahren mit der prädiktiven Anzeige auch bei einer Latenz von 1,5 s in der Lage, einen Slalom flüssig zu durchfahren, wozu ohne Prädiktion niemand im Stande war. Ähnliche Ergebnisse lieferte die Anzeige eines zweiteiligen, prädiktiven Korridors, der die zukünftige Ego-Position und den aktuellen Bremsweg bei Notbremsung des Ego-Fahrzeugs anzeigte (Graf, Palleis, et al., 2020): Die prädiktive Anzeige führte zu einer Verbesserung der Fahrleistung und zu einer Reduktion der Workloads im Vergleich zum Steuern ohne das System. Dagegen zeigte die Untersuchung eines prädiktiven Displaykonzepts zur Anzeige der Latenzkorrigierten Ego-Position und Ego-Bewegungsrichtung zwar eine Verbesserung der Aufgabenleistung um ca. 20 %, allerdings keine signifikante Reduktion des Workloads der Teleoperierenden. Zudem konnte die prädiktive Anzeige negative Auswirkungen der Latenz auf die Fahrleistung nur partiell, aber nicht vollständig kompensieren.

Maßnahme	Befunde	Quellen
Prädiktive Displays	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Fahrleistung • Verbesserung des Situationsbewusstseins • Inkonsistente Befunde bzgl. Workload 	Chucholowski, 2015 Chucholowski et al., 2013 Dybvik et al., 2021 Graf, Abdelrahman, et al., 2020 Tang, 2015
Prädiktive Assistenzsysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Fahrleistung 	Hosseini, 2018 Hosseini & Lienkamp, 2015 Matts & Sterner, 2020
Innovative Displaytechnologien	<ul style="list-style-type: none"> • Inkonsistente Befunde • Teilweise Erhöhung des Workloads 	Georg et al., 2020 Hosseini, 2018 Luo, Wang, Liang, et al., 2021
Multimodale Displays	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Performanz • Verbesserung des Situationsbewusstseins • Inkonsistente Befunde bzgl. Workload 	Kallioniemi et al., 2021 Luo, Wang, Shi, et al., 2021
Algorithmenbasierte Latenzkompensation	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Performanz • Reduktion von Workload 	Lu et al., 2019
Darstellung zusätzlicher Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Inkonsistente Befunde • Methodisch teilweise Konfundierung mit Darstellungsmodalität und Displaytechnologien 	Bodell & Gullikson, 2016 Chew et al., 2021 Matts & Sterner, 2020 Neumeier et al., 2019 Thomason et al., 2017
Evocative Summaries	<ul style="list-style-type: none"> • Keine empirischen Befunde 	Mutzenich et al., 2021

Maßnahme	Befunde	Quellen
Operatortraining	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Fahrperformanz • Teilweise Reduktion des Workloads 	Hosseini, 2018 Silva et al., 2018 Suomela, 2001
Emotionsbasiertes Feedback	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Reduktion der Fahrperformanz • Induktion emotionaler Reaktion der teleoperierenden Person 	Rea & Young, 2019

Tab. 2: Kompensierende Maßnahmen.

Eine Erweiterung prädiktiver Displays bzw. Anzeigekonzepte stellen prädiktive Assistenzsysteme dar. Derartige Konzepte können dabei vereinfacht als Kombination von klassischen Assistenzsystemen und prädiktiven Elementen angesehen werden. Hosseini (2018) untersuchte in diesem Zusammenhang den Einfluss eines prädiktiven Bremsassistenten sowie einer prädiktiven, vibrotaktilen Assistenzfunktion für die Spurhaltung auf die Fahrleistung beim Telefahren. Die Ergebnisse zeigten eine Verbesserung der Fahrleistung derart, dass die Verwendung einer prädiktiven Notbremsfunktion zu einer Reduktion von Kollisionen und größeren Sicherheitsabständen führte, während der haptische Spurhalteassistent eine bessere Spurführung bei Fahrstreifenwechseln und weniger Überreaktion beim Ausweichen bedingte. Ähnliche Ergebnisse lieferte die Untersuchung einer prädiktiven Assistenzfunktion zur optischen Hervorhebung anderer Verkehrsteilnehmer wie Fahrzeugen und zu Fuß gehender Personen (Matts & Sterner, 2020), wobei die Ergebnisse aufgrund methodischer Einschränkungen (Darstellung der Fahrszene als Video statt Telefahren, Reaktionszeit für Knopfdruck bei Erkennen einer zu Fuß gehenden Person als Fahrperformanzmaß, geringe Stichprobengröße) auf das Telefahren von Realfahrzeugen nur schwer verallgemeinert werden können. Im Hinblick auf die Teleoperation stellt sich dabei grundsätzlich auch die Frage, inwieweit die Verwendung klassischer Assistenzsysteme die negativen Effekte der Teleoperation auf Fahrleistung und Workload verringern kann. Insgesamt erscheint die Verwendung prädiktiver Anzeige- und Assistenzsysteme auf Basis der vorliegenden Studienlage als vielversprechender Ansatz zur Kompensation negativer Effekte der Teleoperation auf das Teleoperationspersonal.

Darüber hinaus wurden Ansätze untersucht, die durch die Verwendung innovativer Displaytechnologien, wie Head-Mounted-Displays (HMD) bzw. den Einsatz von Virtual-Reality-Anzeigekonzepten, versuchen, die Nachteile der Teleoperation auf die Fahrzeugführung zu kompensieren. Dabei zielen diese Konzepte auf eine Verbesserung der Fahrleistung durch eine Erhöhung des Situationsbewusstseins der teleoperierenden Person ab, indem sie zum einen das Präsenzerleben verbessern und zum anderen zusätzliche Informationen über die Fahrsituation bereitstellen sollen. In Bezug auf die empirische Überprüfung der Wirksamkeit derartiger Anzeigekonzepte liegen insgesamt inkonsistente Befunde vor. Bei einem Vergleich zwischen herkömmlichen PC-Bildschirmen und deren Erweiterung um ein zusätzliches HMD mit 360°-Sichtfeld, dessen Anzeige auf Basis von LIDAR-Daten generiert wurde, fand Hosseini (2018) Hinweise auf einen positiven Einfluss des zusätzlichen HMD auf das Situationsbewusstsein und die Fahrleistung der Teleoperierenden. Die Ergebnisse stehen damit auch im Einklang mit einer Studie von Luo et al. (2021) zur Steuerung eines telegeführten Fahrzeugs, in der die Verwendung eines HMD gegenüber einer klassischen Bildschirmansicht zu einer Reduktion von Kollisionen führte. Dagegen lieferten ähnlich gestaltete Untersuchungen von Georg, Putz & Diermeyer (2020) und Adamides et al. (2017) keine Hinweise auf signifikante Einflüsse von HMD bzw. eines Mixed-Reality-Anzeigekonzepts. Dabei ist jedoch anzumerken, dass in den genannten Studien die Darstellung mittels

HMD bzw. Mixed-Reality-Displays teilweise mit einem höheren Informationsgrad (größeres Sichtfeld) bezüglich der Fahrsituation einherging, was den Vergleich der Anzeigekonzepte mit klassischen Bildschirmen und HMD erschwert. Aufgrund der insgesamt inkonsistenten Befunde ist eine klare Beantwortung der Frage nach der kompensierenden Wirkung von innovativen Displays nicht möglich. Zur Bewertung der Wirksamkeit unterschiedlicher Bildschirmtechnologien sollte in zukünftigen Studien aus methodischer Sicht insbesondere auf eine klare Trennung zwischen den verwendeten Displayarten und der Darstellung zusätzlicher Informationen geachtet werden.

Weiterhin sind multimodale Displays und Anzeigekonzepte als kompensatorische Maßnahmen Gegenstand von Diskussion und Untersuchungen (Chen et al., 2007; Gnatzig et al., 2013; Kettwich et al., 2021). Ziel dieser Maßnahmen ist häufig die Erhöhung des Situationsbewusstseins durch die Darstellung zusätzlicher Informationen ohne eine zusätzliche, visuelle Beanspruchung der teleoperierenden Person zu generieren, indem die Präsentation in haptischer, auditiver, vibrotaktiler oder propriozeptiver Form erfolgt. Dabei weisen Ergebnisse aus Untersuchungen im Bereich teleoperierter Robotik darauf hin, dass multimodale Displays zu verbesserter Aufgabenleistung und reduziertem Workload führen können (Chen et al., 2007) und decken sich teilweise mit ersten Studien zur Wirkung multimodaler Displays bei der teleoperierten Fahrzeugsteuerung. So fanden Kallionimie et al. (2021) bei einem Vergleich visueller, auditiver, vibrotaktiler sowie kombinierter Warnungen in Bezug auf Witterungsverhältnisse (nasse Fahrbahn) heraus, dass jede der Modalitäten allein zur Erhöhung der Fahrperformanz führt, ohne einen signifikanten Einfluss auf den Workload zu nehmen (Ausnahme: auditives Feedback erhöht signifikant die Frustration der Versuchspersonen). Ebenso zeigte eine Studie von Luo et al. (2021), in der Abstandsinformationen visuell-peripher (LED-Streifen) und vibrotaktil (Vibration im frontalen und okzipitalen Kopfbereich) präsentiert wurden, dass beide Darstellungen geeignet sind, um die Fahrperformanz zu verbessern und den Workload der Teleoperierenden zu reduzieren. Schließlich lieferte Tang (2015) einen empirischen Beleg dafür, dass multimodale Displays das Situationsbewusstsein von teleoperierenden Personen erhöhen können: Die Studie untersuchte den Einfluss dreier Maßnahmen zur Verbesserung des Geschwindigkeitsempfindens beim Telefahren, nämlich einem zunehmenden Verschwimmen der Peripherie in der Videodarstellung bei höherer Geschwindigkeit, einem künstlich generierten Motorengeräusch sowie einem künstlich erzeugten, vibrotaktilen Feedback durch den Sitz. Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Maßnahmen zu einer realistischeren Einschätzung (weniger Unterschätzung) der Geschwindigkeit führen als das Fahren ohne zusätzliche Präsentation, wobei eine Kombination aller drei Modalitäten tendenziell ein Überschätzen der Egogeschwindigkeit bedingen und dadurch zu einem defensiveren Fahrverhalten führen kann. Insgesamt kann der kompensatorische Effekt von multimodalen Displays bei Teleoperation als gut belegt bewertet werden, wobei weiterführende Untersuchungen die Frage nach dem Einfluss der Passung zwischen dargestellter Information und der dafür verwendeten Modalität genauer adressieren sollten.

Dagegen versuchen algorithmenbasierte Latenzkompensationsmaßnahmen mittels mathematisch-statistischer Prädiktion eine Reduktion der Latenz zu erreichen. Der Ansatz unterscheidet sich aus wahrnehmungspsychologischer Sicht damit von den bisher diskutierten Maßnahmen, dass die durch die teleoperierende Person erlebte Latenz unmittelbar verringert wird, anstatt die negativen Auswirkungen einer systembedingt höheren Latenz durch Zusatzmaßnahmen zu kompensieren. Lu et al. (2019) untersuchten in diesem Zusammenhang im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie die Wirkung eines modellfreien, mathematischen Prädiktors im Vergleich zum Telefahren mit und ohne Latenz (Faktor: ohne

Latenz/mit nicht kompensierter Latenz/mit kompensierter Latenz). Dabei zeigte sich, dass der verwendete Ansatz geeignet war, die Wirkung der Latenz auf Fahrperformanz und Workload der Teleoperierenden signifikant zu reduzieren. Gleichzeitig ergaben sich aber signifikante, negative Effekte in beiden Maßen zwischen Fahrten ohne Latenz und Fahrten mit kompensierter Latenz. Der untersuchte Ansatz war damit insgesamt nicht in der Lage, die negative Wirkung der Latenz vollständig zu kompensieren (für einen umfassenden Überblick zu modellbasierten und modellfreien Prädiktoren siehe Lu et al., 2019).

Des Weiteren existieren Vorschläge für kompensatorische Maßnahmen, deren Wirksamkeit bis dato kaum oder gar nicht Gegenstand empirischer Untersuchungen war. Mutzenich, Helman & Dalton (2021) schlagen vor, dem Teleoperationspersonal unmittelbar im Vorfeld einer Übernahmeaufforderung eine kurze, videobasierte Einspielung zu präsentieren, die eine Zusammenfassung der Fahrsituation liefert, sog. Evocative Summaries, um die Übernahme der Fahrzeugsteuerung zu erleichtern. Durch eine derartig gestaltete Intervention soll der Aufbau eines für die Übernahme angemessenen Situationsbewusstseins begünstigt und beschleunigt werden, indem der teleoperierenden Person Informationen über die zeitlich vorgelagerte Fahrsituation erhält. Dabei liegen bis dato jedoch keine Untersuchungen vor, die die Wirksamkeit derartiger Maßnahmen empirisch untersuchen. Ebenfalls wenig untersucht ist die Wirksamkeit von emotionsbasiertem Feedback. Rea & Young (2019) untersuchten den Einfluss einer virtuellen mitfahrenden Person, deren Gesichtsausdruck die emotionale Reaktion auf das Fahrverhalten des der fahrzeugführenden Person widerspiegelte, mit zwei verschiedenen Personas (ängstliche Person/waghalsige Person): (1) ängstlich/glücklich als Feedback zu einem zügigen Fahrverhalten, das sich für die ängstliche Person ggf. risikoreich anfühlt, für die waghalsige Person aber angenehm ist und (2) glücklich/genervt als Feedback zu einem defensivem Fahrverhalten, das für die ängstliche Person angenehm, für die waghalsige jedoch zu langsam/langweilig ist. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass durch die Intervention eine emotionale Reaktion seitens der Teleoperierenden erzeugt wird, das gezeigte Fahrverhalten davon aber nicht beeinflusst wird. Schließlich existiert der Vorschlag den negativen Effekten variabler Latenzen dadurch zu begegnen, dass durch Puffern von Video- und anderen zu übertragenden Daten eine konstante Latenz erzeugt wird, wobei eine Erhöhung der Latenz zugunsten einer Reduktion ihrer Variabilität in Kauf genommen wird (Chucholowski et al., 2014; Gnatzig, 2015). Da es aus Sicht des Teleoperationspersonals unerheblich sein sollte, ob die von ihm erlebte Latenz systembedingt ist oder durch ein Puffern der Daten künstlich erzeugt wird, sollten sich aus theoretischer Sicht ähnliche Grenzwerte für die tolerierbare Verzögerung ergeben, wobei eine empirische Überprüfung nach derzeitigem Stand noch aussteht.

Schließlich wird das gezielte Training von Teleoperationspersonal häufig als potenziell wirksame kompensatorische Maßnahme genannt (Cummings et al., 2021; Hosseini, 2018; Kallioniemi et al., 2021; Schrank & Kettwich, 2021; Suomela, 2001). Gleichzeitig finden sich wenige Arbeiten zum Einfluss von Trainings auf Maße wie Fahrleistung und Workload beim Telefahren. Einen Hinweis auf eine Verbesserung der Fahrleistung aufgrund von Übungseffekten lieferte eine Untersuchung zum Telefahren eines Baustellenfahrzeugs (Suomela, 2001): Innerhalb der ersten drei Trials reduzierte sich die zum Durchfahren eines Testparcours notwendige, durchschnittliche Fahrzeit signifikant von 3 min 14 s auf 1 min 26 s. Die Ergebnisse stehen damit im Einklang mit einer Untersuchung von Cunningham et al. (2001) zum Einfluss unterschiedlicher Latenzen beim Fahren in Fahrsimulatoren: Die Fahrleistung der Versuchspersonen verbesserte sich durch das Training signifikant, wobei sich der Effekt nicht nur für bereits gefahrene Strecken, sondern auch neue

Straßenverläufe zeigte. Die Autoren werteten diesen Befund als Hinweis auf einen Generalisierungseffekt hinsichtlich der Anpassung an die vorliegende Latenz. Schließlich zeigten auch die Resultate einer Vorstudie zum Telefahren eines simulierten Fahrzeugs von Hosseini (2018) positive Trainingseffekte: Die Versuchspersonen wiesen beim Durchfahren eines simulierten Testparcours nach einem zweistündigen Fahrtraining mit verschiedenen Szenarien eine Verbesserung der Spur- und Abstandshaltung auf. Insbesondere deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass das Training geeignet war, die negativen Effekte einer Latenz von bis zu 500 ms zu reduzieren, wobei alle Fahrten vor, während und nach dem Training mit einem prädiktiven Anzeigeconcept absolviert wurden. Eine Generalisierung der Studienergebnisse ist aufgrund der geringen Stichprobengröße ($n = 2$) allerdings nicht möglich. Insgesamt sprechen die positiven Befunde für eine grundsätzliche Wirksamkeit von Trainings als Kompensationsmaßnahme beim Telefahren. Gleichzeitig macht die geringe Anzahl empirischer Studien weitere Untersuchungen erforderlich.

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Die vorangegangene Analyse der einschlägigen Literatur zum Thema Teleoperation zeigt, dass Workload, Situationsbewusstsein und Fahrperformanz der teleoperierenden Personen von einer Reihe von Einflussfaktoren abhängen. Dabei unterscheiden sich die Faktoren hinsichtlich der vorliegenden empirischen Evidenz: Die Ergebnisse von Untersuchungen zu Latenz und Videoqualität sprechen eindeutig für deren Einfluss auf die Fahrperformanz und es lassen sich mit Einschränkungen quantitative Grenzen in Bezug auf eine angemessene Fahrperformanz angeben. Dahingegen ergeben sich für die verbleibenden Faktoren Bedienelemente, innovative Displaytechnologien, Darstellung zusätzlicher Informationen und Verwendung zusätzlicher Modalitäten wie auch unterschiedliche Teleoperationsmodi aufgrund fehlender bzw. inkonsistenter Befunde kein eindeutiges Bild. Hinsichtlich der Modi der Teleoperation ist darüber hinaus festzustellen, dass die überwiegende Mehrheit der betrachteten Quellen die Untersuchung von Telefahren zum Gegenstand haben, wohingegen Teleassistenz nur wenig beforscht wurde, was die Bewertung des Faktors Teleoperationsmodus überdies erschwert.

	Latenz	Bedienelemente	Videoqualität	Innovative Bildschirntechnologien	Zusätzlich dargestellte Informationen	Modus der Teleoperation
Workload	Empirisch gesichert	Empirisch gesichert	Empirisch gesichert	Inkonsistente Befunde	Inkonsistente Befunde	Geringe Anzahl / keine empirischen Studien
Situationsbewusstsein	Empirisch gesichert	Inkonsistente Befunde	Empirisch gesichert	Inkonsistente Befunde	Empirisch gesichert	Geringe Anzahl / keine empirischen Studien
Performanz	Empirisch gesichert	Inkonsistente Befunde	Empirisch gesichert	Inkonsistente Befunde	Empirisch gesichert	Geringe Anzahl / keine empirischen Studien

Tab.3: Überblick zur Befundlage bzgl. des Einflusses verschiedener Faktoren auf Workload, Situationsbewusstsein und Performanz von teleoperierenden Personen.

Hinsichtlich kompensatorischer Maßnahmen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab: Während einzelnen Maßnahmen wie prädiktiven Displays und Assistenzsystemen wie auch dem Training von Teleoperationspersonal auf Basis der Studienlage eine positive Wirkung bescheinigt werden kann, liegen bezüglich der übrigen Maßnahmen nur wenige (emotionsbasiertes Feedback), inkonsistente (Darstellung zusätzlicher Informationen, multimodale Displays, innovative Displaytechnologien) oder bis dato keinerlei (Evocative Summaries) empirische Befunde zu deren Wirksamkeit vor. Vor dem Hintergrund der aufgezeigten, negativen Einflüsse bestimmter Faktoren wie der Latenz, deren unmittelbares Ausmaß in realen Anwendungen nur schwer direkt reduziert werden kann, bedarf es daher weiterer Forschungsbemühungen zur Wirksamkeit der genannten und ggf. weiterer möglicher kompensatorischer Maßnahmen. Insbesondere sollte hier vor dem Hintergrund inkonsistenter Befunde bzgl. Einflussfaktoren und kompensatorischer Maßnahmen auf eine methodisch korrekte Trennung der Faktoren Darstellung zusätzlicher Informationen, multimodale Displays und innovative Displaytechnologien geachtet werden.

3 Beschreibung bestehender Teleoperatorarbeitsplätze

3.1 Bestandsaufnahme bestehender Teleoperatorarbeitsplätze

3.1.1 Leitstand

Die Literatur- sowie eine Internetrecherche ergab eine Reihe von Teleoperatorarbeitsplätzen, die hauptsächlich zu Forschungs- und Demonstrationszwecken aufgebaut wurden.

Tab. 4 stellt die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Teleoperatorarbeitsplätze dar. Aufgeführt sind lediglich Arbeitsplätze für Teleoperation auf regulären Straßen (nicht in unbefestigtem Gelände, vgl. Bodell & Gulliksson, 2016) und Aufbauten, die spezifisch für die Teleoperation vorgenommen wurden (d.h. keine Fahrsimulatoren, die im Rahmen einer Studie für die Teleoperation genutzt wurden; vgl. Neumeier et al., 2019). Auch prototypische Aufbauten für Machbarkeitsdemos (vgl. Shen et al., 2016) sind nicht enthalten. Tab. 5 gibt eine Übersicht über bekannte Leitstände, die von Firmen verwendet werden, die im Bereich der Teleoperation tätig sind.

Da sowohl in wissenschaftlichen Artikeln als auch auf Firmen-Webseiten keine detaillierten technischen Spezifikationen veröffentlicht werden (z.B. zum Sichtfeld), kann die Darstellung nur einen basalen Eindruck der bestehenden Teleoperatorarbeitsplätze geben.

Literaturquelle und Anwendungsgebiet	Beschreibung Teleoperatorarbeitsplatz
Gnatzig (2015) / TUM Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei 24"-Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale und Gangwahlhebel • Auswahlmöglichkeit unterschiedlicher Kamerasetups • Anzeige von aktueller Geschwindigkeit oder Fahrtrichtungsanzeiger
Chucholowski (2015) / TUM Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei 55"-Bildschirme mit Darstellung der Umgebung in Realgröße • SENSO-Wheel Lenksystem und Pedalerie (Kraftsensor bei Bremspedal) • Lenkstockhebel und Schaltwippen • 5.1 Surround System und Bassshaker im Sitz
Chucholowski (2015) / TUM Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme (180° Sicht) • Pkw-Sitz

Literaturquelle und Anwendungsgebiet	Beschreibung Teleoperatorarbeitsplatz
DLR (2022) ² Remote Assistance	<ul style="list-style-type: none"> • Sechs Bildschirme • Touchdisplay • Tastatur und Maus
Hofbauer et al. (2020) Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale • Spiele-Sitz
Hunsicker et al. (2021) Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Fünf Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale • Spiele-Sitz
Kettwich et al. (2021) Remote Assistance	<ul style="list-style-type: none"> • Sechs Bildschirme (drei für Videodarstellung, einer für Detailansichten, einer für die Anzeige von Störungen, einer für die Kartendarstellung) • Touch-Display zur Vorgabe von Wegpunkten • Bedienung durch Tastatur und Maus

Tab. 4: In der Literatur beschriebene Leitstände bzw. Teleoperatorarbeitsplätze für Forschungszwecke.

Firma und Anwendungsgebiet	Beschreibung Teleoperatorarbeitsplatz
Designated Driver (2019) https://designateddriver.ai Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Sechs Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale • Spiele-Sitz
Einride (2024) https://www.einride.tech/ Remote Assistance	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme • Tastatur und Joysticks • Not-Aus Schalter
Fernride (2024) https://www.fernride.com/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Bildschirm mit verschiedenen Sichten (relevant für Rangieren) • Lenksystem und Pedalerie
Ottopia (2022) https://ottopia.tech/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Fünf Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale

² https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/02/20220405_teleoperation-hilft-wenn-das-autonome-fahrzeug-nicht-weiterweiss (Stand: 23.08.2022)

Firma und Anwendungsgebiet	Beschreibung Teleoperatorarbeitsplatz
Phantom Auto (2022) (https://phantom.auto) Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Curved Bildschirm mit drei Ansichten (260°) • Eingebettete Rückspiegel • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale • Not-Aus-Schalter • Maus
Roboauto (2022) https://roboauto.tech/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale
Soliton (2022) https://solitonsys.com/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme mit transparenter Darstellung der A-Säulen • Lenksystem mit Feedback • Pkw-Sitz mit Vibration und Bewegung • Lautsprecher für Umgebungsgeräusche
Vay (2022) https://vay.io/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Bildschirme mit eingebetteten Rückspiegelansichten • Lenksystem und Pedalerie • Pkw-Sitz • Not-Aus Schalter
Voysys (2020) (in Habibovic et al., 2020) https://www.voy-sys.se/ Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Leinwand • Spiele-Lenkrad inkl. Pedale

Tab. 5: Von im Bereich der Teleoperation tätigen Firmen beschriebene Leitstände bzw. Teleoperatorarbeitsplätze.

Sowohl die für die Forschung aufgebauten als auch die von der Industrie verwendeten Teleoperatorarbeitsplätze zeigen große Ähnlichkeiten:

- **Telefahren:** Für die Anwendung des Telefahrens werden ausschließlich Arbeitsplätze verwendet, die kompakten Fahrsimulatoren ähneln. Es werden drei oder mehr Bildschirme für die Sichtdarstellung verwendet. Dabei werden die Rückansichten (vergleichbar zu Außen- und Innenspiegel) meist in die Frontsichten eingebettet. Als Leitstand wird häufig ein aus dem Spielbereich übernommenes Lenkrad inklusive Pedalerie verwendet. Auch die Sitze entstammen teilweise dem Gaming-Bereich. Für reale Arbeitsplätze im Dauereinsatz wird diese Hardware häufig durch professionellere Lenkräder und Pedale mit realistischerem Feedback und ergonomische Sitze ersetzt. Die Leitstände verzichten dabei in den meisten Fällen auf eine Bewegungsdarstellung. Zur Geräuscharstellung werden von den Autoren und Firmen wenige Angaben gemacht. In der Regel sind Not-Aus Schalter verbaut.
- **Teleassistenz:** Beispiele für Teleoperatorarbeitsplätze für die Teleassistenz finden sich in der wissenschaftlichen Literatur und auf Firmen-Homepages deutlich seltener. Meist wird statt eines Fahrzeugsitzes ein Bürostuhl verwendet und die Auswahl bzw.

Eingabe von Trajektorien und/oder Wegpunkten findet über Eingabeinstrumente wie Tastatur, Touchdisplay und Maus statt. Die optische Darstellung der aktuellen Verkehrsumgebung ist oft mit der Darstellung bei Teleoperatorarbeitsplätzen für das Telefahren vergleichbar.

3.1.2 Benutzeroberfläche

In der wissenschaftlichen Literatur und auf den Internetseiten von Teleoperations-Firmen finden sich nur spärliche Informationen zur graphischen Benutzeroberfläche der vorgestellten Teleoperatorarbeitsplätze. Die Beschreibung beschränkt sich vielmehr auf Eindrücke und Bildmaterial. Bedienkonzepte oder Funktionalitäten werden nicht beschrieben.

Tab. 6 stellt die in der wissenschaftlichen Literatur dargestellten Benutzeroberflächen dar. Tab. 7 gibt eine Übersicht über die von im Bereich der Teleoperation tätigen Firmen verwendeten Benutzeroberflächen von Teleoperatorarbeitsplätzen.

Literaturquelle und Anwendungsgebiet	Beschreibung GUI
Buchholz et al. (2020) Remote Assistance (vermutlich)	<ul style="list-style-type: none"> • Vogelperspektive, eingeblendeter Rückspiegel • Sicht von schräg hinten auf das Fahrzeug • Hilfslinien (keine genauere Beschreibung) • Fahrzeugposition (auf Karte) • Fahrzeugstatus (z.B. bzgl. Sensorfunktion) • Aktueller Teleoperationsmodus
Hofbauer et al. (2020) Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Sechs Kameras (drei Frontsichten, drei Sichten nach hinten entsprechend Außen- und Innenspiegel) • Fahrzeugstatus

Tab. 6: In der Literatur beschriebene Benutzeroberflächen von Teleoperatorarbeitsplätzen zu Forschungszwecken.

Firma und Anwendungsgebiet	Beschreibung GUI
DriveU.auto (2022) https://driveu.auto Remote Driving	<ul style="list-style-type: none"> • Frontsicht mit eingeblendeten Außen- und Innenspiegelsichten • Information über aktuelles Wetter und Uhrzeit/Datum • Fahrzeugstatus (Ganganzeige, Geschwindigkeit, Fahrtrichtungsanzeiger, aktuelle Beschleunigung, Fahr- und Bremspedalbedienung, Lenkradstellung) • Status Kommunikationsverbindung und Latenz • Aktueller Teleoperationsmodus und Übernahmeaufforderung
Ottopia (2022) https://ottopia.tech/ Remote Assistance	<ul style="list-style-type: none"> • Drei Frontsichten • Mögliche Fahrtrajektorien zur Auswahl • Touchdisplay zur Wahl einer Fahrtrajektorie

Tab. 7: Von im Bereich der Teleoperation tätigen Firmen beschriebene Benutzeroberflächen von Teleoperatorarbeitsplätzen.

Aufgrund der geringen Zahl von Bedienoberflächen, die in der Literatur und auf den Firmenseiten im Internet gezeigt werden, können keine allgemeinen Aussagen zu den typischen Merkmalen dieser Bedienoberflächen gemacht werden.

Am detailliertesten ist die Darstellung von DRIVEU.AUTO (2022) mit folgenden Merkmalen:

- Frontsicht mit eingeblendeten Außen- und Innenspiegelsichten
- Information über aktuelles Wetter und Uhrzeit/Datum
- Fahrzeugstatus (Ganganzeige, Geschwindigkeit, Fahrtrichtungsanzeiger, aktuelle Beschleunigung, Fahr- und Bremspedalbedienung, Lenkradstellung)
- Status Kommunikationsverbindung und Latenz
- Aktueller Teleoperationsmodus und Übernahmeaufforderung

Weitere Angaben zu Funktionalitäten, Menüstrukturen und Konfigurationsmöglichkeiten werden weder in den wissenschaftlichen Artikeln noch auf den Firmenseiten gemacht.

3.2 Kategorisierungsaspekte von Teleoperatorarbeitsplätzen

Folgende Komponenten bilden zusammen den Teleoperatorarbeitsplatz (die Beschreibung orientiert sich an den Teilelementen eines Fahrsimulators, vgl. Negele, 2007):

- **Sichtdarstellung:** Die meisten Informationen zum Aufbau des Situationsbewusstseins bei der teleoperierenden Person, zur Bewertung einer aktuellen Fahrsituation und zum Steuern des Fahrzeugs werden über den visuellen Kanal transportiert. Daneben ist die Sichtdarstellung wichtig für das Präsenzepfinden.
Wichtige Spezifikationen der Sichtdarstellung sind:
 - Bildschirme vs. andere Bildmedien (z.B. Leinwand, Head-Mounted Display; damit verbunden: Entfernung des Bildmediums vom Auge der teleoperierenden Person)
 - Anzahl der Bildschirme (bzw. Bildkanäle)
 - Horizontaler und vertikaler Sichtbereich
 - Bildauflösung und -übertragung
 - Darstellung der rückwärtigen Sicht (eingebettet in Frontsichten, eigene Monitore)
 - Zusätzliche Sichthilfen (z.B. Vogelperspektive, transparente Darstellung der A-Säule)Die passende Sichtdarstellung hängt in hohem Maße von der Fahraufgabe und dem gefahrenen Fahrzeug ab. So ist beim Fahrstreifenwechsel und bei Abbiegevorgängen eine Sicht zur Seite notwendig, während beim Folgen des Fahrstreifens mit dem Pkw nur die Frontsicht relevant ist. Im Pkw dienen die Rückspiegel hauptsächlich dazu, den rückwärtigen Verkehr zu beobachten, während im Lkw die Rückspiegel auch für Stabilisierung und Spurhaltung genutzt werden. Die Bildauflösung muss die Erkennbarkeit von fahrrelevanten Informationen ermöglichen (z.B. Verkehrszeichen). Die Bildübertragung sollte eine möglichst ruckfreie Darstellung bei geringer Latenz garantieren.
- **Bewegungsdarstellung:** Beim Fahren eines Fahrzeugs werden über das Gleichgewichtsorgan Beschleunigungen wahrgenommen. Der fahrenden Person nutzt diese Information zumeist unbewusst für eine fertigkeitbasierte Anpassung seiner Bedieneingaben. Der Nutzen eines Bewegungssystems ist auch im Rahmen der Fahrsimulation nicht eindeutig und hängt von der Leistungsfähigkeit des Bewegungssystems sowie insbesondere der Abstimmung des Systems (Motion-Cueing), von den weiteren Sinneseindrücken, die die Fahrenden wahrnehmen, und der Fahraufgabe ab (Frey, 2016).

Teleoperatorarbeitsplätze verzichten in der Regel auf die Bewegungsdarstellung über ein Bewegungssystem.

- Geräuscharstellung: Geräusche liefern beim Fahren eine Reihe von zusätzlichen Informationen über das gefahrene Fahrzeug und die Verkehrsumgebung. Im Rahmen der teleoperierten Fahrzeugsteuerung sind sie weiterhin für das Präsenzepfinden der teleoperierenden Person von Relevanz. Je nach darzustellender Frequenz sind für die Wiedergabe Lautsprecher bzw. Kopfhörer oder Körperschallwandler angezeigt. Wichtige Spezifikationen der Geräuscharstellung sind:
 - Ausgabegeräte (Kopfhörer, Lautsprecher, Körperschallwandler)
 - Frequenzbereich
 - Lokalisierbarkeit

Die übertragenen Geräusche sollten der teleoperierenden Person als Informationsquelle dienen können. Dafür ist es vor allem notwendig, dass sie realistisch klingen (Frequenz und Lautstärke) und lokalisierbar sind.

- Leitstand: Der Leitstand beeinflusst in hohem Maße das Präsenzepfinden des Operators. Es wird zwischen generischen Aufbauten, Teilfahrzeugen und vollständigen Fahrzeugen als Mockup unterschieden.

Wichtige Spezifikationen des Leitstands sind:

- Mockup (z.B. kein spezifisches Mockup, generisches Mockup, Teilfahrzeug, Vollfahrzeug)
- Primäre Bedienelemente (z.B. Lenkrad, Fahr- und Bremspedal)
 - Lenkkraftsimulation (z.B. Komplexität und Realitätsnähe des zugrundeliegenden Modells bzw. Übertragung aus dem Realfahrzeug)
 - Feedbackqualität bei Pedalbedienung
- Sekundäre Bedienelemente (z.B. Licht, Fahrtrichtungsanzeiger)

Für das Telefahren erscheinen ausschließlich generische Mockups angebracht, die lediglich nach Fahrzeugkategorien unterschiedlich sind (z.B. Pkw vs. Lkw). Je nach Bediendauer sind dabei insbesondere auch ergonomische Aspekte (z.B. des Sitzes und der Sitzposition) wichtig. Bei indirekter Fahrzeugsteuerung (Teleassistenz) kann auf ein Mockup verzichtet werden.

- Unterstützungssysteme: Ähnlich wie bei Fahrzeugführung unmittelbar im Fahrzeug kann auch die teleoperierende Person durch eine Reihe von Assistenzsystemen in der Fahraufgabe unterstützt werden.

Mögliche Assistenzsysteme sind:

- Unterstützung der Längsführung (z.B. Abstandsregeltempomat, Intelligenter Geschwindigkeitsassistent, Kollisionsvermeidung)
- Unterstützung der Querverführung (z.B. Spurhalteassistent, Spurverlassenswarner)
- Unterstützung bei der Absicherung (z.B. Abbiegeassistent, Kreuzungsassistent, Spurwechselassistent)
- Unterstützung der sekundären Bedienungsaufgaben (z.B. Fernlichtassistent)
- Navigationssystem
- Verkehrszeichenerkennung
- Parkassistent

Unter der Voraussetzung, dass das zu steuernde Fahrzeug mit den entsprechenden Assistenzsystemen ausgestattet ist, ein für die Teleoperation passendes HMI vorhanden ist und keine technischen Probleme vorliegen (z.B. Sensorausfall), können all diese Systeme das Teleoperationspersonal bei der direkten Fahrzeugsteuerung wirksam unterstützen.

Weitere Aspekte bei der Kategorisierung von Teleoperatorarbeitsplätzen können sein,

- ob der Arbeitsplatz ausschließlich zur Anbindung an Realfahrzeuge geeignet ist (oder z.B. im Rahmen von Trainings auch zur Steuerung virtueller Fahrzeuge in einer Fahrsimulation dienen kann),

- die Eigenschaften und Funktionalität der graphischen Benutzeroberfläche sowie deren Konfigurierbarkeit (wie z.B. die Verfügbarkeit und Übernahme eines bestimmten Steuerungsauftrags durch die teleoperierende Person bestätigt wird) sowie
- eine ggf. vorhandene Messvorrichtung zur Datenaufzeichnung und Logging-Möglichkeit (z.B. Bedieneingaben durch das Teleoperationspersonal, Videoaufnahmen des Teleoperationspersonals).

Von hoher Relevanz für die Ausgestaltung eines Teleoperatorarbeitsplatzes ist seine konkrete Anwendung, insbesondere der Teleoperationsmodus (d.h. Telefahren vs. Teleassistenz).

Für Teleoperatorarbeitsplätze, die für Forschungs- oder Trainingszwecke verwendet werden, kann die Einstellbarkeit und Qualität von Kommunikationsparametern (Latenz, Jitter, Bandbreite, Videoqualität) eine wichtige Funktionalität sein. Für die Steuerung realer Fahrzeuge ist dagegen auf eine hohe Qualität der Kommunikationsverbindung und ihre entsprechende Absicherung und Informationssicherheit (Security) zu achten.

Eine Auflistung der zu spezifizierenden Teilsysteme von Teleoperatorarbeitsplätzen gibt Tab. 8. Die Darstellung ist dahingehend exemplarisch, dass es für die verschiedenen Komponenten weitere Implementierungs- und Lösungsmöglichkeiten geben kann, die in der Tabelle nicht genannt werden.

Teilsystem	Komponente	Kategorien
Sichtdarstellung	Bildmedium	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor • Leinwand • Head-Mounted Display
	Bildrate	In fps
	Anzahl der Bildkanäle	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Frontsichtkanäle • Anzahl Rücksichtkanäle • Anzahl zusätzlicher Sichtkanäle (z.B. Vogelperspektive)
	Darstellung der rückwärtigen Sicht	<ul style="list-style-type: none"> • Eingebettet in Frontsicht • Eigene Monitore
	Horizontaler Sichtbereich der Frontsicht	<ul style="list-style-type: none"> • Hauptsichtbereich (40-60°) • Teilsicht (120-140°) • Vollsicht (180-220°) • Rundumsicht (360°)
	Vertikaler Sichtbereich	Blickwinkel in °
	Bildauflösung	in Pixel
	Horizontaler Sichtbereich der	In °

Teilsystem	Komponente	Kategorien
	rückwärtigen Sicht	
	Sichthilfen	<ul style="list-style-type: none"> • Vogelperspektive • Transparente Darstellung der A-Säule • Prädiktive Darstellung <ul style="list-style-type: none"> ○ Egofahrzeug ○ Umgebungsverkehr
Geräuscharstellung	Ausgabegerät	<ul style="list-style-type: none"> • Kopfhörer • Lautsprecher • Körperschallwandler
	Frequenzbereich	In Hz
	Lokalisierbarkeit von Geräuschen	<ul style="list-style-type: none"> • Möglich • Nicht möglich
Leitstand	Mockup	<ul style="list-style-type: none"> • kein spezifisches Mockup • generisches Mockup • Teilfahrzeug • Vollfahrzeug
	Primäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Lenkrad (inkl. Darstellung Lenkkraft) • Fahrpedal (inkl. Darstellung Pedalkraft) • Bremspedal (inkl. Darstellung Pedalkraft) <p>(Beschreibung der im Fahrzeug gestellten Zielgröße)</p>
	Sekundäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Licht • Fahrtrichtungsanzeiger • ... <p>(jeweils inkl. konkreter Umsetzung über Hebel, Taster, oder GUI)</p>
Anbindung	Art der Anbindung	<ul style="list-style-type: none"> • Reale Fahrplattform • Virtuelles Fahrzeug
	Fahrzeugart	<ul style="list-style-type: none"> • Pkw • Lkw • Sonstige
Graphische Benutzeroberfläche	Bedienkonzept	(Beschreibung Bedienkonzept)
	Eingabeinstrumente	<ul style="list-style-type: none"> • Maus • Tastatur • Touch-Display

Teilsystem	Komponente	Kategorien
	Dargestellte Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Bzgl. Teleassistenz • Bzgl. Telefahren • Bzgl. Kommunikationsverbindung • Bzgl. Kontrollzentrum (jeweils vollständige Auflistung)
	Funktionalität	<ul style="list-style-type: none"> • Leitstandsbezogene Funktionen (z.B. Übernahme Fahrzeug) • Kommunikationsfunktionen • Teleassistenz-Funktionen • Überwachungsfunktionen (Auflistung aller Funktionen, die über die eigentliche Fahrzeugsteuerung hinausgehen)
	Konfigurierbarkeit	(Beschreibung Konfigurierbarkeit)
Überwachung Teleoperation	Datenlogging	<ul style="list-style-type: none"> • Videoaufzeichnung • Datenaufzeichnung/Blackbox <ul style="list-style-type: none"> ○ Fahrdaten ○ Bedieneingaben
	Operatorzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Hands-on Erkennung • Alkohol-Wegfahrsperr • Müdigkeitserkennung • Aufmerksamkeitserkennung
	Abnahme/Passung Teleoperatorarbeitsplatz	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Auftreten der Bewegungskrankheit • Expertenurteil • Subjektives Feedback der teleoperierenden Personen • Gute Fahrperformanz (vgl. zu Fahrzeugsteuerung unmittelbar im Fahrzeug) • Subjektives Feedback von mitfahrenden Personen im Fahrzeug
Kommunikationsverbindung	Technische Realisierung	<ul style="list-style-type: none"> • WLAN • Mobilfunk
	Funktionalität	<ul style="list-style-type: none"> • Automatischer Umgang mit reduzierten Bandbreiten (um z.B. Latenz zu optimieren bzw. Jitter zu reduzieren) • Einstellmöglichkeiten für Teleoperierende • Folgen eines Kommunikationsabbruchs bzw. zu hoher Latenzen
	Absicherung	(Beschreibung der Security-Maßnahmen)
	Teleassistenz	<ul style="list-style-type: none"> • Ja vs. nein

Teilsystem	Komponente	Kategorien
Teleoperationsmodi		<ul style="list-style-type: none"> • Falls ja: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vorgabe von Wegpunkten/Trajektorien ○ Freigabe von Trajektorien
	Telefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Ja vs. nein • Falls ja: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vollständige Steuerung von Quer- und Längsführung ○ Teilweise Steuerung von Quer- und Längsführung (d.h. ein Teil wird vom Fahrzeug automatisiert durchgeführt) ○ Unterstützung durch Assistenzsysteme
Unterstützungssysteme	Unterstützung der Längsführung	<ul style="list-style-type: none"> • Abstandsregeltempomat • Intelligent Speed Adaptation • Kollisionsvermeidung
	Unterstützung der Querverführung	<ul style="list-style-type: none"> • Spurhalteassistent • Spurverlassenswarner
	Unterstützung bei der Absicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Abbiegeassistent • Kreuzungsassistent • Spurwechselassistent
	Unterstützung der sekundären Bedienungsaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Fernlichtassistent
	Unterstützung bei der Navigation	<ul style="list-style-type: none"> • Navigationssystem • Kartendarstellung • Einbezug aktueller Verkehrslage
	Weitere	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrszeichenerkennung • Parkassistent

Tab. 8: Zu spezifizierende Teilsysteme von Teleoperatorarbeitsplätzen.

4 Konzept eines ideal-typischen Leitstands

4.1 Herausforderungen bei Ableitung von empirisch begründeten Mindestanforderungen

Die Literaturlbasis zur Teleoperation von Fahrzeugen ist aktuell noch nicht ausreichend, um Mindestanforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz abzuleiten. Ein breites Spektrum an Forschungsfragen zur teleoperierten Fahrzeugführung konnte bisher nicht zufriedenstellend beantwortet werden. Dies betrifft z.B. die empirische Befundlage zu potenziellen Einflussfaktoren auf die Fahrsicherheit und möglichen kompensatorischen Gestaltungsmaßnahmen des Leitstands.

Bei der Betrachtung der Literaturlbasis war entsprechend eine Ermittlung von Grenzwerten, jenseits derer eine sichere Telefahrt nicht mehr gewährleistet werden kann, nur für einzelne Einflussfaktoren (Latenz, Bildrate) und nur mit Einschränkungen (z.B. bzgl. des Geschwindigkeitsbereichs) möglich. Gleichzeitig liefert die Bestandsaufnahme zu Teleoperatorarbeitsplätzen, die aktuell in Forschung und Industrie zum Einsatz kommen, nur wenige Informationen über die genaue Spezifikation der betrachteten Aufbauten. Grund hierfür ist, dass die durch Internetpräsenz und Veröffentlichungen durch Unternehmen bereitgestellten Inhalte kaum Informationen über den Aufbau der verwendeten Teleoperatorarbeitsplätze liefern und technische Details zu den verbauten Komponenten nicht angeben werden. Insgesamt ist eine Definition von empirisch begründeten Mindestanforderungen an die Spezifikation relevanter Gestaltungsaspekte von Teleoperatorarbeitsplätzen auf Basis des aktuellen Forschungsstandes nicht bzw. für einzelne Aspekte nur partiell möglich.

Um trotz der genannten Einschränkungen Mindestanforderungen ableiten zu können, wird folgendes Vorgehen gewählt: Sofern möglich, werden Anforderungen auf Basis der vorliegenden empirischen Evidenz abgeleitet. Für Aspekte, für die mangels ausreichender Studienlage keine empirisch gesicherten Empfehlungen abgegeben werden können, werden stattdessen Anforderungen auf Basis von Best Practices abgeleitet, die sich an den Konfigurationen derzeit in Forschung und Industrie eingesetzter Teleoperatorarbeitsplätze orientieren. Zudem werden zurzeit geltende rechtliche Anforderungen, die für die Gestaltung von Arbeitsplätzen relevant sind, miteinbezogen und bei gegebener Übertragbarkeit auf die Teleoperation von Fahrzeugen in den Anforderungen berücksichtigt.

4.2 Mindestanforderungen an den Aufbau des Leitstands

4.2.1 Gesetzliche Anforderungen

Für die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen ergeben sich potenzielle Anforderungen einerseits aus gesetzlichen Richtlinien zur Steuerung eines Fahrzeugs im Straßenverkehr. Andererseits sind der gesetzliche Rahmen für die Arbeitsplatzgestaltung für Bild-

schirmarbeitsplätze sowie ergonomische Gestaltungsprinzipien zu beachten. Darüber hinaus wird geprüft, inwiefern gesetzliche Regelungen zum automatisierten und autonomen Fahren Konsequenzen für die Teleoperation von Fahrzeugen nach sich ziehen.

Vorgaben zur Steuerung eines Fahrzeugs

Bei der Typgenehmigung von Fahrzeugen sind Richtlinien und Vorschriften zu beachten. Für die grenzübergreifende Harmonisierung von technischen Regelungen sind UN/ECE-Regelungen verfasst worden, die technische Vorschriften international einheitlich definieren und von den beteiligten Staaten in nationale Gesetze umgesetzt werden.

So regelt UN/ECE R 125 einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Sichtfeldes der fahrzeugführenden Person nach vorn und definiert einen Sichtbereich von 180°. Die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO³) definiert in §35b, dass ein ausreichendes Sichtfeld unter allen Betriebs- und Witterungsverhältnissen gewährleistet sein muss. Gnatzig et al. (2013) fassen zusammen, dass nach den EU-Richtlinien zum Führen eines Kraftfahrzeugs

- ein horizontaler Sichtwinkel von mindestens 180° nach vorne erforderlich ist,
- die Seitenspiegel jeweils mindestens 12° Sichtwinkel für Pkw bzw. 56° für Lkw bieten müssen und
- eine Rückansicht mit etwa 20° vorhanden sein muss.

Da bei der Fahrzeugführung die visuelle Informationsverarbeitung überwiegt und deutlich wichtiger ist als der haptische oder auditive Sinneskanal, sollten die entsprechenden Vorgaben der UN/ECE R 125 auch durch einen Teleoperatorarbeitsplatz erfüllt werden.

Weitere UN/ECE-Regelungen, die für den Aufbau und die Gestaltung eines Teleoperatorarbeitsplatzes relevant sein könnten und entsprechend der konkreten Anwendungsszenarien des Teleoperatorarbeitsplatzes geprüft werden sollten, sind (Liste nicht vollständig):

- R 46 Rückspiegel
- R 121 Kontrollleuchten und Anzeiger
- R 130 Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihres Spurhaltewarnsystems
- R 131 Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Notbremsassistentensystems (AEBS)
- R 155 Cybersicherheit und Cybersicherheitsmanagementsystem
- R 156 Softwareaktualisierung und Softwareaktualisierungsmanagementsystem

Gemäß Verordnung EU 2019/2144 wird für die Typgenehmigung zukünftig gefordert, dass ein System zur Überwachung der Aufmerksamkeit der fahrzeugführenden Person im Fahrzeug vorhanden ist. Da beim Telefahren auch weiterhin ein Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr gesteuert wird, erscheint eine Überwachung der Aufmerksamkeit von Teleoperationspersonal ebenfalls sinnvoll. Dabei sollten die verwendeten Systeme die Vorgabe des Euro NCAP Assessment Protocol – Safety Assist erfüllen. Entsprechend sollte der Algorithmus zur Ablenkungserkennung Long Distraction (einzelne längere Ablenkung ≥ 3 Sekunden, die den Blick von der Straße lenkt) von Short Distraction (wiederholte kurze Blicke weg von der Fahrbahn, die das Bewusstsein für die Fahrsituation kumulativ verringern; innerhalb eines Zeitraums von 30 Sekunden schaut die fahrzeugführende Person in Summe 10 Sekunden von der Fahrbahn weg) unterscheiden.

³ Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist

Soweit solche Systeme im Rahmen eines Kontrollzentrums oder Teleoperatorarbeitsplatzes umgesetzt werden, sollten die Regeln und Vorschriften bzgl. anderer Systeme (z.B. technische Redundanz, Security, Erstellung sicherer Software) entsprechend umgesetzt werden, die die Sicherheit des Betriebs teleoperierter Fahrzeuge erhöhen können.

Vorgaben zur Gestaltung von Bildschirmarbeitsplätzen

Die Arbeitsstättenverordnung trifft nationale Regelungen für die menschengerechte Gestaltung von Arbeitsplätzen zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten (ArbStättV⁴). Die Regelung findet auf Grundlage des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG⁵) statt, die wiederum die europäische Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie (RL 89/391/EWG⁶) und auf dieser Richtlinie basierende europäische Einzelrichtlinien umsetzt. Die ArbStättV regelt die Arbeitsbedingungen jedoch relativ allgemein. Konkretere Richtlinien für die praktische Umsetzung der Anforderungen der ArbStättV in den Betrieben erfolgen durch die technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR). So sind Mindestwerte z.B. für die Beleuchtung eines Schreibtischarbeitsplatzes festgeschrieben. Für Tätigkeiten wie Schreiben, Lesen und Datenverarbeitung ist eine Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux vorgesehen (ASR A3.4 Beleuchtung)⁷. Die Tiefe und die Breite der Bewegungsfläche für Tätigkeiten im Sitzen müssen mindestens 1,0 m betragen sowie eine Bewegungsfläche von mindestens 1,5 m² und ein Luftraum von mindestens 12,0 m³ zur Verfügung stehen (ASR A1.2 Raumabmessungen und Bewegungsflächen)⁸. Darüber hinaus darf in Bezug auf die herrschende Lautstärke ein Beurteilungspegel von 70 dB(A) nicht überschritten werden (ASR A3.7 Lärm).

Einen aufbereiteten Überblick darüber, wie Bildschirmarbeitsplätze aussehen sollen, liefern die DGUV Regel 115-401 Bürobetriebe⁹ und die DGUV Information 215-410¹⁰. Diese stellen beispielsweise dar, dass bei Mehr-Bildschirm-Lösungen die Bildschirme schmale Gehäuserahmen haben und dicht beieinanderstehen sollten. Auch sollten Bildschirme mit geringer Blickwinkelabhängigkeit eingesetzt werden und zur Vermeidung von Reflexionen nach Möglichkeit matte Oberflächen aufweisen. Zudem werden Empfehlungen zu weiteren Displayparametern (Bilderwiederholfrequenz von mindestens 60 Hz bei LCD) gegeben und eine individuelle Anpassbarkeit von Kontrast, Helligkeit und Neigung von Displays (bis 35° Neigungswinkel) sowie eine flimmerfreie Darstellung von Inhalten formuliert, wobei detaillierte Vorgaben zu Sehabstand und Mindestgröße für die Darstellung alphanumerischer Informationen gemacht werden. Weiterhin werden z.B. auch Zielstellungen für eine ergonomisch gestaltete Software beschrieben (wie z.B. Aufgabenangemessenheit, Selbst-

⁴ Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), die zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3334) geändert worden ist

⁵ Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 6k des Gesetzes vom 16. September 2022 (BGBl. I S. 1454) geändert worden ist

⁶ Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit (Amtsblatt Nr. L 183 vom 29/06/1989 S. 0001 – 0008)

⁷ ASR A3.4 Beleuchtung, Technische Regel für Arbeitsstätten, Ausgabe: April 2011 (GMBI 2011, S. 303; zuletzt geändert GMBI 2022, S. 248)

⁸ ASR A1.2 Raumabmessungen und Bewegungsflächen, Technische Regel für Arbeitsstätten, Ausgabe: September 2013 (GMBI 2013, S. 910, zuletzt geändert GMBI 2022, S. 241)

⁹ DGUV (2018). DGUV Regel 115-401: Branche Bürobetriebe. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.

¹⁰ DGUV (2019). DGUV Information 215-410: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze – Leitfaden für die Gestaltung. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.

beschreibungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Fehlertoleranz, Lernförderlichkeit). Da ein Teleoperatorarbeitsplatz in hohem Ausmaß einem Bildschirmarbeitsplatz entspricht, sollten die entsprechenden Gestaltungsvorgaben erfüllt werden.

Gesetze und Verordnungen zum autonomen Fahren

Gemäß der *Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften* des Bundesministeriums für Digitalisierung und Verkehr (BMDV) ist die manuelle Steuerung eines mit automatisierten Fahrfunktionen ausgestatteten Fahrzeugs durch eine nicht im Fahrzeug befindliche Person nur bis zur Schrittgeschwindigkeit erlaubt, wobei zwischen steuernder Person und Fahrzeug ein maximaler Abstand von sechs Metern (Luftlinie) nicht überschritten werden darf¹¹. Für Fahrten mit höheren Geschwindigkeiten über Schritttempo hinaus wird dagegen das Vorhandensein eines Sitzplatzes für die fahrzeugführende Person im Fahrzeug gefordert, der gemäß den geltenden Vorschriften gestaltet sein muss.

Dagegen finden sich hinsichtlich der Teleassistenz bei aktiver Automation keine generellen Einschränkungen. Lediglich bei der Vorgabe von Fahrmanövern zum Verlassen des risikominimalen Zustands durch die sogenannte technische Aufsicht wird gefordert, dass das Fahrmanöver durch das Automationssystem validiert wird. Die technische Aufsicht begleitet den autonomen Fahrbetrieb aus der Distanz und aktiviert bzw. deaktiviert bestimmte Fahrmanöver und -funktionen. Die Verordnung macht hinsichtlich der Ausbildung und Qualifikation der als technische Aufsicht eingesetzten Personen bestimmte Vorgaben, auf die an dieser Stelle nicht eingegangen wird.

Gleichzeitig lassen sich aus der Verordnung keine Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen ableiten, da sich die Übernahme der Fahraufgabe durch manuelle Steuerung auf eine fahrzeugführende Person im bzw. in der Nähe des Fahrzeugs bezieht.

4.2.2 Mindestanforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze

Im Folgenden werden Mindestanforderungen hinsichtlich der Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen entsprechend dem in Kapitel 4.1 dargestellten Vorgehen erarbeitet. Hierbei wird auf die Kriterien

- Sichtdarstellung,
- Räumliche Gestaltung, Beleuchtung und Geräuscharstellung,
- Leitstand,
- Unterstützungssysteme,
- Grafische Benutzeroberfläche,
- Überwachung der Teleoperation,
- Kommunikationsverbindung und
- Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes

eingegangen.

¹¹ Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenrechtlicher Vorschriften vom 24. Juni 2022 (BGBl. I S. 986), Anhang I, Ziffer 4.

Die vorgeschlagenen Mindestanforderungen sollten im Rahmen der Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen umgesetzt werden. Gleichzeitig sollten die dargestellten Anforderungen bei neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen oder technischen Entwicklungen entsprechend angepasst werden. Eine Zusammenfassung der Anforderungen liefert Tab. 9.

Sichtdarstellung

Hinsichtlich der Visualisierung der Fahrsituation wird die Verwendung reflexionsfreier Bildschirme (LCD/CRT) gefordert. Alternativ können Projektoren und Leinwände verwendet werden. Die Forderung ergibt sich zum einen aus der insgesamt unklaren Befundlage zum Einfluss innovativer Displaytechnologien und der damit verbundenen Gefahr von Bewegungskrankheit sowie zum anderen auf der bewährten Verwendung klassischer Displays und fahrsimulatorähnlicher Aufbauten im Forschungs- und Industriesetting. Die Bildwiederholfrequenz des Ausgabemediums sollte dabei mindestens 60 Hz betragen. Bezüglich der Sichtdarstellung ist mit Verweis auf die Anwendung geltender rechtlicher Regelungen für das Steuern von Fahrzeugen im Straßenverkehr ein frontaler Sichtbereich von mindestens 180° in horizontaler und 40° in vertikaler Richtung sowie für Pkw ein rückwärtiges, horizontales Sichtfeld von mindestens 20° entsprechend zur Darstellung des Fahrzeuginnenspiegels zu fordern. Bei Teleassistenz ist evtl. auch eine ausreichend schwenkbare Teilsicht ausreichend. Für einen rückwärtigen Sichtbereich, der der Präsentation von Außenspiegeln entspricht, ist dagegen ein horizontaler Sichtwinkel von mindestens 12° für die Steuerung von Pkw bzw. 56° (Weitwinkelrückspiegel) für die teleoperierte Lkw-Steuerung erforderlich. Eine Integration der rückwärtigen Sicht in die Anzeige des Frontsichtbereichs ist nur dann zulässig, wenn dadurch die geforderten Mindestsichtwinkel für die Frontsicht nicht unterschritten werden; andernfalls wird die Darstellung auf einem separaten Anzeigemedium gefordert¹². Für die videovermittelte Darstellung der Fahrsituation ist überdies eine Bildrate von mindestens 10 fps aufgrund der empirisch belegten Leistungseinbuße bei Unterschreiten dieser Bildrate zu verwenden. Im Mittel sollte eine Bildrate von ca. 24 fps angestrebt werden, da geringere Bildraten zu höherem Workload und schnellerer Erschöpfung führen. Schließlich sollte die Darstellung der Front- und Rückwärtssicht eine optische Präsentation der aktuellen Trajektorie enthalten, um den Aufbau eines angemessenen Bewusstseins für die räumlichen Ausmaße des Fahrzeugs durch die teleoperierende Person zu erleichtern.

Räumliche Gestaltung, Beleuchtung und Geräuscharstellung

Hinsichtlich räumlicher Aspekte sind Teleoperatorarbeitsplätze derart zu gestalten, dass der teleoperierenden Person eine Bewegungsfläche von mindestens 1,5 m² mit einer Tiefe von mindestens 1,0 m und einer Mindestbreite von 1,0 m entsprechend der Vorgaben für Bildschirmarbeitsplätze zu Verfügung steht, wobei die Mindestbreite auf mindestens 1,2 m zu erhöhen ist, falls weitere, entsprechende Arbeitsplätze räumlich unmittelbar an den Teleoperatorarbeitsplatz anschließen. Dabei darf es nicht zur Überlappung zweier oder mehrerer Bewegungsflächen kommen. Überdies muss der je Arbeitsplatz zur Verfügung stehende Luftraum mindestens 12,0 m³ betragen. Zudem ist eine Beleuchtungsstärke von mindestens 500 lx einzuhalten, wobei darauf geachtet werden muss, dass keine

¹² Bemerkung: Die Mindestanforderungen bezüglich der Sichtwinkel kann auch durch eine horizontale 360°-Rundsicht erfüllt werden, wobei hierbei ein vertikaler Sichtwinkel von mindestens 40° erreicht werden muss.

Reflexionen auf Displays oder anderen Arbeitsoberflächen entstehen. Hinsichtlich der Geräuscharstellung ist darauf zu achten, dass die verwendeten Ausgabegeräte¹³ (Lautsprecher oder Kopfhörer) in der Lage sind, die für die Teleoperation des Fahrzeugs notwendigen, akustischen Informationen über die Fahrsituation abzubilden. Hierbei ist es nicht notwendig, den gesamten Frequenzbereich des menschlichen Gehörs (20 Hz bis 20 kHz) abzubilden, solange sichergestellt ist, dass die für die sichere Fahrzeugsteuerung relevanten, akustischen Informationen abgebildet werden. Sollten zukünftige Forschungsarbeiten differenzierte Aussagen über den notwendigen Frequenzbereich erlauben, sollten die Anforderungen entsprechend angepasst werden. Der herrschende Geräuschpegel darf einen Beurteilungspegel von 70 dB(A) gemäß der Arbeitsschutzrechtlichen Bestimmungen für Büroarbeitsplätze nicht überschreiten.

Leitstand

In Bezug auf den Leitstand wird für das Telefahren gefordert, dass die Verwendung von fahrzeugcockpitähnlichen Bedienelementen (Lenkrad, Pedalerie) vorgesehen ist. Die Forderung ergibt sich aus der Praktikabilität, von der aufgrund der häufigen, erfolgreichen Verwendung ähnlicher Aufbauten im Forschungs- und Industriesetting ausgegangen werden kann. Wenn der Nachweis einer ebenbürtigen direkten Fahrzeugsteuerung über innovative Bedienelemente (z.B. Joystick) gelingt, dann kann auch diese Verwendung finden. Für die Teleassistenz ist eine Anpassung hinsichtlich der genauen Aufteilung der Fahraufgabe zwischen Fahrzeug und teleoperierender Person erforderlich. Insbesondere ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für die Vorgabe von Trajektorien auf der einen Seite und der reinen Bestätigung von Trajektorien, die durch das Fahrzeugsystem vorgeschlagen werden. Mit Blick auf die sekundären Bedienaufgaben sind Bedienelemente für Fahrtrichtungsanzeiger, Warnblinker, Lichtsteuerung, Hupe, Fernlicht, Nebelschweinerwerfer sowie Feststellbremse notwendig, um eine adäquate Steuerung der genannten Teilsysteme durch das Teleoperationspersonal sowie eine Anpassung an die Fahrsituation und -umgebung zu ermöglichen. Zudem muss ein Bedienelement für die Initiierung eines Minimal Risk Manuevers vorhanden sein. Für die genaue Ausgestaltung kommen dabei physische oder touchbasierte Bedienelemente infrage, wobei ergonomische Aspekte in der Gestaltung und Anordnung berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich des Mockups ist ein generischer Aufbau zu wählen, der individuell an spezielle, zusätzliche Anforderungen, die sich aus den jeweils adressierten Anwendungsfällen ergeben können, angepasst werden kann. Dabei scheinen die generellen Charakteristika von bisher in Forschung und Industrie verwendeter Mockups, die häufig dem grundlegenden Aufbau statischer Fahrsimulatoren ähneln, als grundsätzlich geeignete Basis für den Aufbau von Teleoperatorarbeitsplätzen, insbesondere für den Anwendungsfall des Telefahrens.

Unterstützungssysteme

Weiterhin werden der Einbau und die Verwendung von geeigneten Systemen zur Unterstützung des Teleoperationspersonals gefordert. Zum einen muss ein System im Fahrzeug vorhanden sein, das das Fahrzeug bei einem Abbruch der Verbindung zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz mittels Ausführung eines Minimal Risk Manuevers in einen

¹³ Bemerkung: Befinden sich mehrere Teleoperatorarbeitsplätze in einem Raum, sodass eine akustische Trennung zwischen der Geräuscharstellung verschiedener Arbeitsplätze nicht gewährleistet ist, so wird die Verwendung von Kopfhörern dringend empfohlen, um eine gegenseitige akustische Ablenkung des Teleoperationspersonals zu verhindern.

sicheren Zustand überführt. Die Auslösung eines Minimal Risk Manuevers muss dabei auch durch die teleoperierende Person bzw. weitere Rollen innerhalb des Kontrollzentrums initiiert werden können. Letzteres ist notwendig, um ggf. eine Auslösung des Manövers anzustoßen, wenn die teleoperierende Person aufgrund ihres Zustands nicht in der Lage ist, das Fahrzeug sicher zu betreuen bzw. zu steuern. Zum anderen muss das teleoperierte Fahrzeug einen Spurhalteassistenten (inkl. Spurverlassenswarner) besitzen. Die Forderung ergibt sich aus dem grundlegenden Problem der Latenz bei der bidirektionalen Übertragung von Daten zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz: Durch die verzögerte Darstellung besteht die Gefahr, dass eine telefahrende Person zu spät erkennt, wenn das gesteuerte Fahrzeug der Begrenzung des Egofahrstreifens zu nahekommt oder sie sogar überschreitet, was zu sicherheitskritischen Situationen infolge ungewollten Spurverlassens führen kann. Dagegen kann durch Verwendung der geforderten Systeme einem ungewollten Verlassen des Fahrstreifens entgegengewirkt werden. Hierbei ist jedoch aufgrund der derzeitigen Forschungslage nicht eindeutig geklärt, ob sich die Verwendung von Spurhalteassistenten generell in jedem Anwendungsfall (z.B. Stadtfahrten) positiv auf die Fahrleistung auswirkt oder (insbesondere bei höheren Latenzen) die negativen Teleoperationseffekte unter bestimmten Bedingungen potenziell verstärkt. In diesem Zusammenhang steht auch die Frage, inwieweit derzeitige im Fahrzeug vorhandene Systeme technisch-konzeptionell auf teleoperiertes Fahren, bspw. im Sinne prädiktiver Assistenzsysteme (Hosseini et al., 2016), bzw. das Teleoperationssystem insgesamt (d.h. mit den einzelnen Teilsystemen Fahrzeug, Teleoperatorarbeitsplatz, Kommunikationsschnittstelle, Kontrollzentrum) angepasst werden müssen, was Gegenstand weiterer Forschungsbemühungen sein muss. Zusätzlich wird die Verwendung eines Spurwechselwarners gefordert. Die Forderung ergibt sich abermals aus der latenzbehafteten Darstellung der Fahrsituation: Aufgrund der verzögerten Präsentation und Übertragung von Lenkeingaben an das telegeführte Fahrzeug wird die Gefahr von Kollisionen infolge von Fahrstreifenwechseln erhöht, da der als frei angenommene Fahrstreifen innerhalb der dabei vergangenen Zeit durch andere Fahrzeuge belegt worden sein kann. Durch entsprechende Warnungen und ggf. aktive Lenkeingriffe des Systems kann die Gefahr daraus resultierender Kollisionen reduziert werden. Darüber hinaus wird die Verwendung eines Notbremssystems gefordert, das bei Unterschreiten eines Mindestabstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmenden eine Warnung ausgibt und ggf. eine Notbremsung einleitet. Die Forderung eines derartigen Systems begründet sich zum einen wiederum aus der latenzbedingten Verzögerung in der Präsentation der Fahrsituation und zum anderen aus der potenziell erschwerten Tiefenwahrnehmung, die sich aus der zweidimensionalen, visuellen Darstellung ergibt. Grundsätzlich sollten – soweit passend – alle Systeme, die im Rahmen der EU-Regulation 2019/2144 für die Typgenehmigung von Fahrzeugen vorgeschrieben sind, auch beim Telefahren Verwendung finden. Dies betrifft z.B. den Intelligenten Geschwindigkeitsassistenten (Intelligent Speed Assist, ISA). Für alle Unterstützungssysteme gilt, dass sie mit einem für die teleoperierte Bedienung passenden HMI ausgestattet sein müssen.

Grafische Benutzeroberfläche

Mit Blick auf die grafische Benutzeroberfläche wird die Verwendung einer PC-Maus oder touchbasierter Eingabegeräte gefordert, wobei die Bedienbarkeit bei aktiver Teleoperation im Rahmen der Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes gezeigt werden muss. Dabei wird empfohlen bei der genauen Ausgestaltung den adressierten Teleoperationsmodus (Telefahren/Teleassistenz) zu berücksichtigen. Die individuelle Konfigurierbarkeit der

Oberfläche ist insofern zulässig, wie dadurch die Mindestanforderungen an die Sichtdarstellung erfüllt bleiben. Dabei müssen dem Teleoperationspersonal Informationen zur Höhe der aktuellen Geschwindigkeit, zum aktuellen Geschwindigkeitslimit und zur aktuellen Latenz, zur Reichweite sowie zum aktuellen Status der Lichtanlage (Licht, Fernlicht, Fahrtrichtungsanzeiger) angezeigt werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Anzeige dieser Informationen nicht durch individuelle Konfigurationen ausgeblendet werden können. Bei der Gestaltung der Darstellung alphanumerischer Informationen ist auf eine möglichst gute Lesbarkeit zu achten, wobei entsprechende Richtlinien für Bildschirmarbeitsplätze mit überwiegend lesender und schreibender Tätigkeit als Orientierungshilfe für die Auswahl geeigneter Zeichengrößen herangezogen werden können. Schließlich müssen dem Teleoperationspersonal außerdem Ausfälle von Sensoren (Kameras, Abstandssensoren o.ä.) und unterstützenden Systemen (Spurhalte-/wechselassistent, Notbremsassistent) in Form durchgehender Meldungen angezeigt werden.

Überwachung der Teleoperation

Hinsichtlich der Überwachung des Teleoperationspersonals wird die Konzeption und Implementierung eines angemessenen Incident-Managements gefordert, wobei die entsprechenden Prozesse so zu gestalten sind, dass Vorfälle erfasst, dokumentiert und aufgearbeitet werden mit dem Ziel, die Ursachen des jeweiligen Vorfalles zu analysieren und zukünftig Vorfälle ähnlicher Natur zu vermeiden. Zu diesem Zweck wird zusätzlich die Erfassung bestimmter Daten während der Teleoperation gefordert. Hierzu zählen zum einen Videoaufnahmen der Fahrsituation und die entsprechenden Fahrdaten des Fahrzeugs. Zum anderen ist die Erfassung der teleoperatorseitigen Bedieneingaben zu fordern. Das Datenlogging bergründet sich dabei aus den Anforderungen an das Incident-Management, das eine möglichst umfassende Rekonstruktion von Vorfällen ermöglichen soll. Hierbei sind geltende, rechtliche Bestimmungen hinsichtlich des Datenschutzes zu beachten und umzusetzen. Daneben muss am Teleoperatorarbeitsplatz ein System zur Aufmerksamkeits- und Müdigkeitserkennung implementiert sein und verwendet werden. Grund hierfür ist der durch Teleoperation potenziell erhöhte Workload und die damit verbundene Gefahr der Ablenkung und Ermüdung der Teleoperierenden, die eine Beeinträchtigung der Fahrperformanz und ein erhöhtes Unfallrisiko bedingen können. Zum einen wird dadurch in Verbindung mit entsprechenden Warnungen die Aufmerksamkeitslenkung auf die Fahrsituation begünstigt. Zum anderen können bei Detektion von Ermüdung geeignete Maßnahmen (z.B. Übernahme der Fahraufgabe durch eine andere Person) eingeleitet werden.

Kommunikationsverbindung

In Bezug auf die Gesamtlatenz der Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz wird gefordert, dass ein Wert von 300 ms nicht überschritten wird und eine möglichst geringe Variabilität (Jitter) vorliegt. Der Grenzwert begründet sich durch empirische Untersuchungen aus Simulator- und Realfahrzeugstudien, die auf einen relevanten Einbruch der Fahrperformanz und hohen Workload seitens des Teleoperationspersonals bei Latenzen oberhalb von 300 ms hinweisen, wobei sich die Mehrzahl der Studien auf Fahrgeschwindigkeiten bis 35 km/h beschränken. Der Grenzwert ist damit als absolute Obergrenze im Sinne einer Minimalanforderung zu verstehen, die nicht überschritten werden darf. Gleichzeitig kann auch bei konstanten Latenzen unterhalb von 300 ms nicht für jeden Anwendungsfall von einer angemessenen Beherrschbarkeit des teleoperierten Fahrzeugs ausgegangen werden. Demnach ist der Grenzwert von 300 ms als maxi-

male Obergrenze zu verstehen, die ein System generell nicht überschreiten darf. Umgekehrt kann auch bei einer tatsächlichen Latenz von weniger als 300 ms nicht per se davon ausgegangen werden, dass eine teleoperierte Fahrzeugsteuerung verkehrssicher stattfinden kann. Dies muss vielmehr für die relevanten Anwendungsfälle in entsprechenden Abnahmefahrten gezeigt werden (siehe Unterpunkt *Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes*).

Zusätzlich muss die Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz die Möglichkeit zur Kommunikation zwischen eventuell vorhandenen Fahrzeuginsassen und teleoperierender Person sowie mit dem Kontrollzentrum ermöglichen. Insbesondere muss dabei die Kontaktaufnahme sowohl von Mitfahrenden als auch vom Teleoperationspersonal vorgenommen werden können. Eine derart gestaltete Kommunikationsverbindung erscheint insbesondere mit Blick auf eine Kontaktaufnahme im Notfall zwischen den beteiligten Parteien als sinnvoll und notwendig, wobei hierunter ggf. auch die Kommunikation zwischen Teleoperationspersonal und Einsatzkräften vor Ort fällt (z.B. im Fall einer Verkehrskontrolle). Die teleoperierende Person sollte jedoch eine Kontaktaufnahme durch Fahrgäste ablehnen können, wenn dadurch eine die Fahrsicherheit gefährdende Erhöhung des Workloads (z.B. aufgrund einer ohnehin beanspruchenden Fahrsituation) entstehen könnte.

Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes

Hinsichtlich der Abnahme von Teleoperatorarbeitsplätzen im Vorfeld der Nutzung wird gefordert, dass bei deren Einsatz eine Bewegungskrankheit seitens der Teleoperierenden möglichst vermieden wird. Zudem muss die Fahrperformanz bei Verwendung des Teleoperatorarbeitsplatzes vergleichbar hoch sein wie bei Steuerung durch eine im Fahrzeug präsente Person. Die Abnahme muss dabei unter Berücksichtigung der jeweiligen Szenarien, für die der Teleoperatorarbeitsplatz zum Einsatz kommen soll, erfolgen: Die Abnahmefahrten sollten demnach möglichst nahe an Fahrszenarien orientiert sein, die dem adressierten Anwendungsbereich des teleoperierten Systems entsprechen. Insbesondere ist im Rahmen dessen sicherzustellen, dass die tatsächlich vorliegende Latenz nicht zu einer relevanten Einschränkung der Verkehrssicherheit in den adressierten Anwendungsfällen führt.

Tab. 9 gibt einen Überblick über die aufgestellten Mindestanforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz:

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Sichtdarstellung	Bildmedium	Klassische Bildschirm
	Reflexionen	Reflexionsfreie Anzeigeflächen
	Bildwiederholffrequenz des darstellenden Geräts	Mindestens 60 Hz
	Bildrate (Videobe-zogen)	Mindestens 10 fps (im Mittel bei ca. 24 fps)
	Horizontaler Sichtbereich	Mindestens 180° Teleassistenz: evtl. auch schwenkbare Teilsicht
	Vertikaler Sichtbereich	Mindestens 40°

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
	Innenspiegel	Mindestens 20° bei Pkw
	Außenspiegel	Mindestens 12° bei Pkw Mindestens 56° bei Lkw
	Darstellung der rückwärtigen Sicht	Darstellung auf separaten Displays oder Einbettung in Frontsicht (nur dann, wenn dadurch Mindestanforderungen an horizontalen und vertikalen Frontsichtbereich weiterhin erfüllt bleiben)
	Sichthilfen	Anzeige aktueller Trajektorie in Front- und Rückansicht abhängig von aktueller Fahrtrichtung
Räumliche Gestaltung	Bewegungsfläche	Mindestens 1,5 m ² <ul style="list-style-type: none"> • Tiefe mindestens 1,0 m • Breite mindestens 1,0 m Zusatz: Breite mindestens 1,2 m bei beieinander liegenden Arbeitsplätzen zweier oder mehrerer Mitarbeitender (keine Überlappung der Bewegungsflächen)
	Luftraum	Mindestens 12,0 m ³
	Beleuchtungsstärke	Mindestens 500 lx
Geräuscharstellung (akustische Darstellung der Fahrsituation)	Ausgabegerät	Lautsprecher oder Kopfhörer
	Frequenzbereich	Abdeckung/Darstellung fahrrelevanter Geräuschinformationen
	Lärmbeurteilungspegel	Maximal 70 dB(A)
Leitstand	Mockup	Generischer Aufbau
	Primäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	Telefahren: Fahrzeugcockpit ähnlicher Aufbau (Lenkrad, Pedalerie) oder vergleichbares System Teleassistenz: Abhängig von Aufteilung der Fahraufgabe zwischen Teleoperationspersonal und Fahrzeug <ul style="list-style-type: none"> • Vorgeben von Trajektorien • Bestätigen von Trajektorien Physisches Bedienelement zur Auslösung eines Minimal Risk Manuevers
	Sekundäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	Telefahren: Bedienelemente für <ul style="list-style-type: none"> • Fahrtrichtungsanzeiger + Warnblinker • Licht • Hupe • Fernlicht • Nebelscheinwerfer • Feststellbremse

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
		Umsetzung durch physische oder touchbasierte Bedienelemente Telefahrssystem Modus "Engage" oder "Disengage"
Unterstützungssysteme	Sicherheitssystem für Verbindungsabbruch	System, das Fahrzeug bei Verbindungsabbruch bzw. zu hoher Latenz in einen sicheren Zustand überführt (Minimal Risk Maneuver)
	Unterstützung der Längsführung (nur Telefahren)	Notbremsystem (System ist in der Lage, autonom ein Notbremsmanöver auszuführen)
	Unterstützung der Querführung (nur Telefahren)	Spurverlassenswarner Spurhalteassistent
	Unterstützung bei der Absicherung (nur Telefahren)	Spurwechselwarner
Überwachung Teleoperation	Datenlogging	Videoaufzeichnung der Fahrsituation Fahrdatenaufzeichnung Bedieneingaben
	Operatorzustand	Aufmerksamkeits- und Müdigkeitserkennung (evtl. mit unterschiedlicher Parametrierung für Telefahren und Teleassistentz)
	Incident Management	Konzeptionierung und Implementierung geeigneter Prozesse zur Dokumentation und Analyse aufgetretener Incidents
Graphische Benutzeroberfläche	Eingabeinstrumente	PC-Maus oder touchbasierte Steuerung
	Dargestellte Informationen	Höhe der aktuellen Latenz Aktuelle Geschwindigkeit Aktuelles Geschwindigkeitslimit Fahrzeugzustand <ul style="list-style-type: none"> • Reichweite • Fahrtrichtungsanzeiger (an/aus) • Warnblinker • Licht (an/aus) • Fernlicht (an/aus) Ausfall von Sensoren Ausfall von Unterstützungssystemen Darstellung des aktuellen Modus der Teleoperation (aktiviert, deaktiviert)
	Gesamtlatenz	Weniger als 300 ms Telefahren:

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Kommunikationsverbindung		Nachweis angemessener Fahrperformanz bei tatsächlicher Latenz für die adressierten Anwendungsfälle
	Kommunikation mit Fahrgästen	Möglichkeit zur Kommunikation zwischen Insassen und Teleoperationspersonal sowie Kontrollzentrum
Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes	Verträglichkeit	Kein Auftreten von Bewegungskrankheit
	Fahrsicherheit	Telefahren: Vergleichbare Fahrperformanz wie bei manueller Steuerung in Präsenz

Tab. 9: Vorgeschlagene Mindestanforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze.

4.3 Weitere Empfehlungen für eine verkehrssichere Teleoperation

Die beschriebenen Mindestanforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz gewährleisten nicht die Sicherheit des Teleoperationsbetriebs insgesamt. Einerseits sind im Rahmen des System-of-Systems Ansatzes eine Reihe weiterer Teilsysteme für eine sichere Teleoperation notwendig, andererseits definieren die Mindestanforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz lediglich eine Grundlage für Telefahren und Teleassistenz. Darüber hinaus ist eine Vielzahl von Anwendungsfällen und Situationen vorstellbar, in denen die teleoperierende Person Informationen oder Unterstützung durch ihren Arbeitsplatz benötigt, die über die Mindestanforderungen hinausgehen.

Aus diesem Grund muss jeder Betreibende von teleoperierten Fahrzeugen prüfen, ob im Rahmen seines Betriebs Situationen entstehen können, die eine weitere Anpassung des Teleoperatorarbeitsplatzes nötig machen. Ein möglicher schrittweise Ansatz, wie die dadurch entstehenden Gesamtanforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz erarbeitet und detailliert werden können, wird im Folgenden skizziert (vgl. Bild 2).

- (1) Zusammenstellen eines Teams, das die Analyse der Gesamtanforderungen durchführt.
 - a. Einbeziehen verschiedener Experten aus den Bereichen Technik, Human Factors, Betrieb sowie mit verschiedenen Rollen (Teleoperierende, Leitstellenmitarbeiter, Servicemitarbeiter, Kunde)
 - b. Vorstellen der Zielsetzung, der Arbeitsaufgabe, evtl. Informationsübermittlung bzgl. Teleoperation (z.B. Begriffsklärung) und Sensibilisieren für mögliche Risiken/Gefahren
 - c. Regelung organisatorischer Fragen der Zusammenarbeit des Teams (z.B. Zeitplanung, Häufigkeit von Treffen, evtl. externe Unterstützung)
- (2) Erstellen und Beschreiben der Anwendungsfälle, die im Teleoperationsbetrieb auftreten können.
 - a. Auflistung aller möglichen Szenarien, die während des Teleoperationsbetriebs vorkommen können, und Identifikation von Anwendungsfällen,

bei denen die Mindestanforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz evtl. nicht ausreichen.¹⁴

- b. Einordnung der Anwendungsfälle anhand der Kategorien Teleoperationsmodus, Fahrzeugart, Fahrumgebung und Geschwindigkeitsbereich.
 - c. Detailbeschreibung des Anwendungsfalls in Textform (evtl. inkl. Skizze)
- (3) Darstellung möglicher Risiken, die sich aus dem Anwendungsfall ergeben
- a. Auflisten der potenziellen Risiken. Risiken können in einer Gefährdung von Mitfahrenden, anderen Verkehrsteilnehmenden, einer Beschädigung von Objekten (Egofahrzeug, andere Fahrzeuge, weitere Objekte), einem Verstoß gegen Verkehrsregeln, einem Überschreiten von betrieblichen Grenzen (z.B. maximale Geschwindigkeit laut Anwendungsfall), einem Ausfall des Fahrzeugs (steht für eine gewissen Zeit nicht mehr für Teleoperation zur Verfügung, weil es z.B. nicht mehr ohne Service vor Ort in Betrieb genommen werden kann) oder unangenehmen Situationen für Mitfahrende und Dritte (mit in der Folge verringerter Akzeptanz oder Vertrauen) bestehen.
 - b. Zur Risikoanalyse können auch bekannte Verfahren und Ansätze der Gefahren- und Risikoanalyse verwendet werden (vgl. Hoffmann & Diermeyer, 2021; Kamaraj et al., 2021).
- (4) Prüfen und entscheiden, ob zusätzliche Anforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz, die über die Mindestanforderungen hinausgehen, helfen können, die identifizierten potenziellen Risiken zu kontrollieren
- a. Beschreiben zusätzlicher Anforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz. Die Anforderungen ergeben sich aus den Erfahrungen und der Expertise des Teams sowie wissenschaftlich-empirischen Erkenntnissen.
 - b. Falls relevant, sollten auch Anforderungen an das Gesamtsystem (Organisation, Betrieb und Regelwerk, Personal, Fahrzeugtechnik, Schnittstelle) beschrieben werden.
- (5) Regelmäßige Re-Analyse (vor allem bei Veränderungen im Teleoperationsbetrieb wie z.B. zusätzlichen Anwendungsfällen wie neuen Fahrstrecken, Settings, etc.)
- a. Einbezug von über das Incident Management bekannt gewordener Vorfälle
 - b. Austausch über Erfahrungen im laufenden Betrieb und deren möglicher Implikationen für Anforderungen an den Teleoperatorarbeitsplatz
 - c. Ggf. Ableiten neuer Anwendungsfälle auf Basis der Re-Analyse für eine iterative Anpassung des Teleoperatorarbeitsplatzes an sich ändernde Anforderungen

¹⁴ Evtl. werden in diesem Zusammenhang auch Anwendungsfälle identifiziert, die zusätzliche Anforderungen an andere Teilsysteme der Teleoperation stellen. Diese werden im Weiteren aber nicht beschrieben.

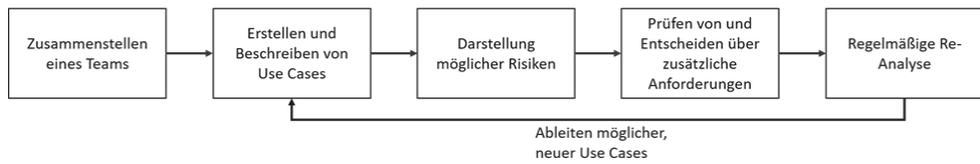


Bild 2: Vorgehen zum Ableiten zusätzlicher Anforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze.

Die in Schritt 5 gewonnenen Erkenntnisse können dabei den Ausgangspunkt für ein erneutes Durchlaufen der Schritte 2 bis 5 bilden und ermöglichen dadurch eine iterative Anpassung an ggf. geänderte Anforderungen.

Die folgenden Tabellen geben Empfehlungen für die sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für vier beispielhafte Anwendungsfälle:

- (1) Übernehmen eines unbeaufsichtigten Pkw
- (2) Kommunikation mit anderem Fahrzeug
- (3) Plötzliche Wetter- und Sichtverschlechterung
- (4) Rechtsabbiegemanöver Lkw

	Modus:	Fahrzeugart:	Fahrumgebung:	Geschwindigkeit:
Anwendungsfall	Telefahren	Pkw	Stadt	≤ 30 km/h
	Beschreibung:	Die teleoperierende Person übernimmt ein geparktes Fahrzeug, das für längere Zeit (d.h. > 5 min) unbeaufsichtigt geparkt war. Es ist kein Personal vor Ort.		
	Mögliche Risiken:	Umgebung hat sich unerkannt verändert (z.B. eingeparkt, Objekt unter bzw. knapp vor/hinter Fahrzeug). Es kommt zu Sach- oder Personenschäden.		
Empfehlung (über Mindestanforderung hinaus)	Sichtdarstellung:	Darstellung der Vogelperspektive		
	Geräuschkdarstellung:	-		
	Leitstand:	-		
	GUI:	Abstand zu Objekten vor, hinter und neben dem Egofahrzeug		
	Überwachung:	-		
	Verbindung:	-		
	Unterstützung:	Parkassistentz		
Sonstige:	Änderung im Betrieb, sodass die Häufigkeit und Dauer unbeaufsichtigter Fahrzeuge reduziert wird. Training entsprechender Situation inkl. der Handlungssicherheit des Teleoperationspersonals.			

Tab. 10: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Übernehmen eines unbeaufsichtigten Pkw“.

Anwendungsfall	Modus:	Fahrzeugart:	Fahrumgebung:	Geschwindigkeit:	
	Telefahren	Lkw	Stadt	≤ 30 km/h	
	Beschreibung:	Das Egofahrzeug steht vorfahrtsberechtigt an einer Kreuzung und möchte links abbiegen. Aufgrund eines Hindernisses in der geplanten Fahrtrajektorie muss jedoch zuerst ein wartendes Fahrzeug fahren, das aufgrund der Vorfahrtsregelung Vorfahrt gewähren muss. Dafür ist eine Kommunikation zwischen dem teleoperierten Fahrzeug und dem wartenden Fahrzeug nötig.			
Mögliche Risiken:	Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen misslingt und es kommt zu Verzögerungen und Missverständnissen.				
Empfehlung (über Mindestanforderung hinaus)	Sichtdarstellung:	-			
	Geräuschartstellung:	-			
	Leitstand:	-			
	GUI:	Möglichkeit, ein eHMI ¹⁵ zu steuern.			
	Überwachung:	-			
	Verbindung:	-			
	Unterstützung:	-			
	Sonstige:	Training des Teleoperationspersonals, wie eine solche Situation aufzulösen ist. Möglichkeit, über ein eHMI mit einem anderen Fahrzeug zu kommunizieren.			

Tab. 11: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Kommunikation mit anderem Fahrzeug“.

Anwendungsfall	Modus:	Fahrzeugart:	Fahrumgebung:	Geschwindigkeit:
	Telefahren	Pkw	Landstraße	≤ 100 km/h
Beschreibung:	Während der Fahrt auf der Landstraße kommt es zu einer plötzlichen Wetterverschlechterung, die eine Weiterfahrt kritisch erscheinen lassen (z.B. extremer Schneefall).			

¹⁵ Durch die Verwendung von externen Mensch-Maschine-Schnittstellen (eHMIs) soll eine verbesserte Vermittlung der Absichten automatisierter Fahrzeuge an andere Verkehrsteilnehmende erreicht werden.

	Mögliche Risiken:	Aufgrund der schlechten Wetterbedingungen werden potenzielle Gefahren nicht rechtzeitig wahrgenommen.
Empfehlung (über Mindestanforderung hinaus)	Sichtdarstellung:	Schlechtwettermodus, der Sensorinformationen nutzt, die durch Wetterbedingungen kaum bzw. nicht beeinträchtigt werden.
	Geräuschartstellung:	-
	Leitstand:	-
	GUI:	Informationen zu Wetter- und Straßenbedingungen und eindeutiger Hinweis, sobald Weiterfahrt unmöglich.
	Überwachung:	-
	Verbindung:	-
	Unterstützung:	-
	Sonstige:	Training entsprechender Situationen inkl. der Handlungssicherheit des Teleoperationspersonals.

Tab. 12: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Plötzliche Wetter- und Sichtverschlechterung“.

	Modus:	Fahrzeugart:	Fahrumgebung:	Geschwindigkeit:
	Telefahren	Lkw	Stadt	≤ 50 km/h
Anwendungsfall	Beschreibung:	Bei Rechtsabbiegemanövern befinden sich zu Fuß gehende und/oder fahrradfahrende Personen neben dem Fahrzeug.		
	Mögliche Risiken:	Bei schlechter Einstellung der Spiegel, Kameras und fehlender Aufmerksamkeit werden Personen gefährdet.		
Empfehlung (über Mindestanforderung hinaus)	Sichtdarstellung:	Darstellung der Vogelperspektive Darstellung der Verkehrssituation neben und hinter dem Fahrzeug ohne tote Winkel bzw. Verdeckung durch Fahrzeug		
	Geräuschartstellung:	-		
	Leitstand:	-		
	GUI:	Informationen zu Wetter- und Straßenbedingungen und eindeutiger Hinweis, sobald Weiterfahrt unmöglich.		
	Überwachung:	-		

	Verbindung:	-
	Unterstützung:	Abbiegeassistent (laut EU-Verordnung 2019/2144 ab 6.7.2022 für neue Fahrzeugtypen und ab 7.7.2024 für neue Fahrzeuge verpflichtend)
	Sonstige:	Training entsprechender Situationen inkl. der Handlungssicherheit des Teleoperationspersonals.

Tab. 13: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Rechtsabbiegemanöver Lkw“.

5 Konzeption eines experimentellen Leitstands

Mit Blick auf die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen zeigt sich, dass eine Vielzahl an Forschungsfragen, wie beispielsweise hinsichtlich des potenziellen Einflusses bestimmter Gestaltungsaspekte, bisher nicht oder nicht vollständig empirisch beantwortet werden konnte. Um hier Abhilfe zu schaffen, werden basierend auf wissenschaftlicher Methodik empirische Untersuchungen notwendig sein. Im Folgenden werden Anforderungen an experimentelle Leitstände abgeleitet, die als Forschungswerkzeug zur Beantwortung offener Forschungsfragen eingesetzt werden können. Hierzu wird zunächst auf experimentalpsychologische Grundlagen und relevante Konzepte empirischer Forschung eingegangen, um allgemeine, experimentalpsychologische Anforderungen abzuleiten. Im Anschluss werden Anforderungen mit Blick auf für Teleoperatorarbeitsplätze relevante Gestaltungsaspekte und damit im Zusammenhang stehende, offene Forschungsfragen wie auch grundlegende technische Aspekte (z.B. Flexibilität und Modularität des Aufbaus) aufgezeigt.

5.1 Experimentalpsychologische Grundlagen

Experimentalpsychologie bzw. experimentelle Psychologie untersucht das Erleben und Verhalten von Menschen, um psychologische Phänomene zu erklären, vorherzusagen oder zu beeinflussen (Vandenbos, 2007). Wesentliches Kennzeichen ist dabei der Einsatz empirischer Forschungsmethoden, insbesondere von Experimenten. Ziel ist das Auffinden, Prüfen und ggf. Quantifizieren von Zusammenhängen zwischen interessierenden Konstrukten unter verschiedenen, möglichst kontrollierten Bedingungen. Grundlage hierfür bilden empirische Untersuchungen experimenteller, aber auch quasi- und nicht-experimenteller Natur, wobei entsprechende Untersuchungen anhand weiterer Aspekte (z.B. Untersuchungssetting: Labor- vs. Feldstudie, Simulator- vs. Realfahrzeugstudie) kategorisiert werden können, die einen Einfluss auf die Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich Übertrag- und Generalisierbarkeit auf reale Sachverhalte nehmen. Im Folgenden wird zunächst auf Grundlagen des empirischen, insbesondere quantitativ-experimentellen Forschungsprozesses sowie zu deren Bewertung herangezogener Gütekriterien eingegangen. Daran anschließend werden wesentliche Aspekte evaluativer Forschungsarbeiten sowie deren Abgrenzung von und deren Besonderheiten gegenüber generellen, wissenschaftlichen Untersuchungen genauer beleuchtet.

5.1.1 Experimentelle Untersuchungen und empirischer Forschungsprozess

Der folgende Abschnitt fasst wesentliche Aspekte des empirischen Forschungsprozesses zusammen. Die Darstellung orientiert sich an Döring und Bortz (2016)¹⁶.

¹⁶ Für eine detaillierte Erklärung des experimentellen Forschungsprozesses sei auf Döring und Bortz (2016) verwiesen

Experimente bzw. experimentelle Untersuchungen erlauben es, Hypothesen über kausale Zusammenhänge zwischen theoretischen Konstrukten zu prüfen, indem eine aktive Manipulation erklärender Variablen (sog. Unabhängige Variablen; UVn) vorgenommen wird und deren potenzielle Auswirkungen auf die zu erklärenden Variablen (sog. Abhängige Variablen; AVn) erfasst werden. Gleichzeitig werden potenzielle Störeinflüsse (sog. Störvariablen; SVn) kontrolliert, deren Variation mit den untersuchten Variablen eine kausale Interpretation der Ergebnisse erschwert. Wesentliches Kennzeichen von Experimenten ist dabei eine zufällige (randomisierte) Zuordnung von Versuchspersonen zu den unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen. Diese sog. Randomisierung stellt eine wesentliche Grundlage dafür dar, dass Ergebnisse experimenteller Untersuchungen kausal interpretiert werden dürfen: Die Randomisierung ist das probate Mittel, um eine systematischen Zuordnung von Versuchspersonen mit bestimmten Merkmalsausprägungen (Störvariablen; SVn) zu bestimmten Untersuchungsgruppen (sog. Konfundierung) zu verhindern, die andernfalls eine potenzielle Alternativerklärung für gefundene Effekte darstellen und eine kausale Interpretation der Ergebnisse im Sinne eines Ursache-Wirkung-Mechanismus erschweren bzw. unmöglich machen kann.

Beispiel für den Einfluss einer konfundierten Störvariablen auf die Interpretation des Ergebnisses einer experimentellen Untersuchung:

Zur Untersuchung des Einflusses einer zusätzlichen Darstellung der Vogelperspektive gegenüber der rein klassischen Darstellung der Fahrsituation mittels Vorder-, Seiten- und Rückseitenkameras auf die Fahrleistung von Teeloperierenden werden die Versuchspersonen zufällig auf zwei gleich große Gruppen entsprechend der Ausprägungen der unabhängigen Variable Vogelperspektive (vorhanden vs. nicht vorhanden) aufgeteilt und die Fahrleistung anhand unterschiedlicher AVn (z.B. Fahrmaße, Fahrfehler) erfasst. Dagegen könnte eine systematische Zuordnung von Personen mit viel Fahrerfahrung zur Untersuchungsgruppe, die mit Vogelperspektive fährt, eine Alternativerklärung für eine mögliche, höhere Fahrleistung darstellen (Konfundierung von UV „Vogelperspektive“ und Personenvariable „Fahrerfahrung“). Die zusätzliche Sichtdarstellung könnte demnach nicht ohne weiteres als Ursache für eine ggf. höhere Fahrleistung angesehen werden.

Generell umfasst der Forschungsprozess bei empirischen, quantitativen Untersuchungen neun Schritte (Döring & Bortz 2016, S. 23): (I) die Festlegung des Forschungsthemas und (II) dessen Einordnung in den theoretischen Hintergrund, (III) die Entscheidung und Festlegung des Untersuchungsdesigns, (IV) die sog. Operationalisierung der interessierenden Variablen, (V) die Stichprobenziehung, die (VI) Datenerhebung, (VII) -aufbereitung und (VIII) -analyse sowie (IX) die Ergebnispräsentation.

Die sich der eigentlichen Datenerhebung (VI) anschließende Aufbereitung (VII) und Analyse (VIII) der gewonnenen Untersuchungsdaten kann dagegen nochmals in fünf Schritte untergliedert werden (Döring & Bortz 2016). Tab. 14 liefert einen entsprechenden Überblick.

#	Auswertungsschritt	Beschreibung
1	Datenbereinigung	Bereinigung des Datensatzes um fehlerhafte Daten, z.B. Messwerte außerhalb des gültigen Wertebereichs, fehlende Messwerte etc.

#	Auswertungsschritt	Beschreibung
2	Stichprobenbeschreibung	Beschreibung der Stichprobe anhand soziodemografischer Merkmale mit Angabe zu Häufigkeitsverteilungen, Mittelwerten und Streuungen, z.B. für Geschlecht, Alter etc.
3	Dateninspektion und deskriptiv-statistische Analyse	Darstellung der Stichprobenverhältnisse für die interessierenden Variablen und deren Relationen in tabellarischer und/oder grafischer Form
4	Interferenzstatistische Analyse	Anwendung statistischer Tests zur statistischen Hypothesenprüfung einschließlich der Prüfung der jeweiligen Voraussetzungen
5	Inhaltliche Interpretation der statistischen Ergebnisse	Diskussion der Bedeutung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf die inhaltlichen Hypothesen und unter Einbezug von Limitationen der Untersuchung

Tab. 14: Fünf Schritte quantitativer Datenanalysen.

5.1.2 Gütekriterien quantitativer Forschung

Zur Bewertung der Qualität wissenschaftlicher Untersuchungen werden vier Gütekriterien herangezogen (Döring & Bortz 2016, S. 90): inhaltliche Relevanz, methodische Strenge, ethische Strenge und Präsentationsqualität.

Mit Blick auf empirisch quantitative Forschungsprojekte nimmt dabei die methodische Strenge eine zentrale Rolle unter den Kriterien ein, mit dem Konzept der sog. Validität beschrieben wird (Döring & Bortz 2016, S. 93). Die Validität wird in diesem Zusammenhang als Grad der Gültigkeit wissenschaftlicher Aussagen verstanden, die aus der jeweiligen Untersuchung abgeleitet werden. Nach Campbell (1957, zitiert nach Döring & Bortz 2016, S. 93) wird dabei zwischen vier Arten der Validität unterschieden: Konstruktvalidität, interne Validität, externe Validität und statistische Validität. Während die Konstruktvalidität eine Bewertung dahingehend erforderlich macht, ob durch die hergestellten Versuchsbedingungen und die verwendeten Messinstrumente die tatsächlich interessierenden theoretischen Konstrukte angemessen repräsentiert werden, liegt interne Validität vor, wenn für die interessierenden Effekte zweifelsfrei ein kausaler Zusammenhang zwischen UVn und AVn angenommen werden kann; sie hängt damit auch maßgeblich vom verwendeten Untersuchungsdesign (experimentell/quasi-experimentell/nicht-experimentell) und der Kontrolle potenzieller SVn ab. Die externe Validität gibt dagegen an, inwieweit sich die Ergebnisse der Untersuchung über das konkret verwendete Untersuchungssetting hinaus verallgemeinern lassen. Schließlich bezieht sich die statistische Validität auf die Qualität der statistischen Datenanalyse.

Generell ist das Erreichen einer möglichst hohen Validität ein wichtiges Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen. Gleichzeitig können Designentscheidungen zur Erhöhung einzelner zu einer Verringerung anderer Validitätsaspekte führen. Beispielsweise führt die Entscheidung für die Durchführung eines Experiments im Laborsetting (z.B. bei Fahrsimulatorstudien) zugunsten einer möglichst hohen internen Validität im Allgemeinen zu einer verrin-

gerten externen Validität, da durch die hochkontrollierte Laborumgebung die Verallgemeinerbarkeit auf den realen, attendierten Sachverhalt (z.B. Fahren im Realverkehr) reduziert wird. Umgekehrt bedingen Feldstudien im Allgemeinen eine Erhöhung der externen Validität auf Kosten der Verringerung der internen Validität.

5.1.3 Grundlagen der Evaluationsforschung

Die Evaluationsforschung befasst sich mit der wissenschaftlich fundierten Bewertung von Sachverhalten hinsichtlich verschiedener Bewertungskriterien (z.B. Effektivität, Effizienz, Akzeptanz, Nachhaltigkeit etc.; Döring & Bortz 2016). Die Evaluationsforschung ist generell anwendungsorientiert. Es werden sozialwissenschaftliche Methoden genutzt, um den Evaluationsgegenstand anhand sog. Evaluationskriterien zu bewerten. Die resultierende Bewertung soll dabei unterschiedliche Funktionen, wie beispielsweise die Legitimierung oder Optimierung bestimmter Maßnahmen, erfüllen. Sie ist somit auch durch eine aktive Nutzung der resultierenden Evaluationsergebnisse gekennzeichnet. Die Evaluationsforschung ist dabei den üblichen Prinzipien und Kriterien der Wissenschaftlichkeit verpflichtet.

Beispiel: Evaluation eines Teleoperatorarbeitsplatzes zum Einsatz in Logistikzentren

Ein Konzept für die Gestaltung eines Teleoperatorarbeitsplatzes für den Einsatz von teleoperierten Lkw auf dem Gelände eines Logistikzentrums soll evaluiert werden. Neben der praktischen Umsetzbarkeit des Konzepts und dem Nachweis einer sicheren Fahrzeugsteuerung soll dabei auch eine Bewertung des potenziellen Kosten-Nutzen-Verhältnisses vorgenommen werden.

Um eine wissenschaftlich fundierte Bewertung eines Evaluationsgegenstandes im Rahmen evaluativer Forschungsprozesse zu ermöglichen, müssen klare, messbare Bewertungs- bzw. Evaluationskriterien festgelegt werden. Dabei wird zwischen Kriterien zur (1) Konzeptevaluation, zur (2) Prozess- bzw. Implementierungsevaluation und zur (3) Ergebnisevaluation unterschieden.

Neben der Festlegung der Evaluationskriterien ist es zudem erforderlich, sog. Bewertungsstandards festzulegen, d.h. Ausprägungen für die gewählten Evaluationskriterien, anhand derer die Ergebnisse der Evaluation als positiv, ausreichend oder negativ bewertet werden. Hierbei können Mindest-, Regel- oder Maximalstandards unterschieden werden, die als relative Änderung gegenüber einem Ausgangs- oder Vergleichszustand (z.B. Verbesserung der Fahrleistung von Teleoperierenden durch den Einsatz bestimmter Kompensationsmaßnahmen) oder als Absolutwert (z.B. Kostenreduktion durch Einsatz von Teleoperation) formuliert werden.

5.2 Anforderungen an experimentelle Leitstände

Der derzeitige Stand der wissenschaftlichen Literatur zur Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen aus Human-Factors-Sicht hat gezeigt, dass eine Vielzahl von Forschungsfragen hinsichtlich des Einflusses bestimmter, relevanter Faktoren bisher unbeantwortet ist (vgl. Kapitel 2.4). Um methodisch fundierte, empirische Untersuchungen zur Beantwortung offener Fragen zur Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen durchführen zu können, muss ein experimenteller Leitstand eine Reihe technischer wie experimentalpsychologischer Anforderungen erfüllen.

Im Folgenden wird zunächst auf experimentalpsychologische Anforderungen an den Aufbau und die Modularität von experimentellen Leitständen eingegangen, wobei zwischen generellen, übergeordneten experimentalpsychologischen Anforderungen und Anforderungen, die sich im Speziellen aus offenen Fragen zu potenziellen Einflussfaktoren auf Fahrleistung, Workload und Situationsbewusstsein von Teleoperationspersonal ergeben, unterschieden wird. Anschließend wird auf Anforderungen an die Gestaltung von Human-Machine-Interfaces (HMIs) bzw. graphische Benutzeroberflächen (Graphical User Interfaces; GUIs) von experimentellen Leitständen eingegangen, wobei dabei zum einen auf die Anforderungen an HMIs eingegangen wird, mit denen Teleoperierende im Rahmen der teleoperierten Fahrt unmittelbar interagieren, und zum anderen auf HMIs, die durch Versuchsleitende zur Gestaltung, Durchführung und Steuerung experimenteller Untersuchungen verwendet werden.

5.2.1 Überlegungen zur simulationsbasierten Teleoperation

Die Nutzung einer Fahrsimulation, um insbesondere Human-Factors Fragestellungen der teleoperierten Fahrzeugsteuerung zu beantworten, ergänzt die Forschung unter Nutzung realer (Modell-)Fahrzeuge. Im Gegensatz zu grundsätzlichen Kritikpunkten bzgl. Fahrsimulatorstudien (vgl. De Winter et al., 2012) weist die Teleoperation eines virtuellen Fahrzeugs in der Simulation deutlich weniger Nachteile auf. So ist die eingeschränkte physische und wahrnehmungsbezogene Realitätstreue ein Charakteristikum des Teleoperatorarbeitsplatzes. Entsprechende Einschränkungen in der Simulation (z.B. zweidimensionale Darstellung der dreidimensionalen Fahrsituation, potenziell reduziertes Präsenzerleben) sind damit gewünscht und unterstützen die Validität der simulationsbasierten Teleoperation. Auch mögliche Probleme von Unwohlsein und Unbehagen sind nicht zwingend simulatorspezifisch, sondern können auch bei der Teleoperation auftreten. Eine Reihe von Argumenten gegen die Verwendung von Fahrsimulatoren als Forschungs- und/oder Trainingsinstrument entfällt hier somit. Aus experimentalpsychologischer Sicht ergibt sich hingegen eine Reihe von Vorteilen wie bspw. Ein hohes Maß an Replizierbarkeit zu untersuchender Fahrsituationen oder die vergleichsweise einfache Variation von Untersuchungsbedingungen (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.2.3). Insbesondere erlaubt die simulationsbasierte Teleoperation die Untersuchung des Einsatzes dieser Technologie unter Bedingungen (z.B. Stadtverkehr, kritische Situationen), die bisher im Realverkehr noch nicht erprobt wurden bzw. erprobt werden konnten, ohne das Risiko einer Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer eingehen zu müssen.

5.2.2 Experimentalpsychologische Anforderungen

Aus experimentalpsychologischer Sicht ergeben sich Anforderungen an experimentelle Leitstände aus zwei wesentlichen, übergeordneten Zielen: Zum einem soll der Einsatz von experimentellen Leitständen als Untersuchungsmethode generell zu einer möglichst hohen wissenschaftlichen Qualität in Forschungsvorhaben, in denen sie zum Einsatz kommen, beitragen. Zum anderen muss ihr physischer wie auch hard- und softwareseitiger Aufbau wie auch deren Variierbarkeit prinzipiell die Beantwortung einer möglichst großen Zahl offener Forschungsfragen, insbesondere hinsichtlich Einflussfaktoren auf Teleoperationspersonal, ermöglichen. Im Folgenden wird daher zunächst auf allgemeine Anforderun-

gen an experimentelle Leitstände eingegangen, deren Einhaltung zur Erfüllung wissenschaftlicher Standards in Untersuchungen zu Teleoperatorarbeitsplätzen beitragen soll. Anschließend wird auf spezifische Anforderungen an experimentelle Leitstände eingegangen, die sich aus bisher nicht abschließend beantworteten Forschungsfragen zu Gestaltungsaspekten ergeben, die einen potenziellen Einfluss auf Teleoperierende besitzen und sich an den aufgestellten Mindestanforderungskategorien orientieren.

Generelle experimentalpsychologische Anforderungen

Um unter Einsatz von experimentellen Leitständen eine möglichst große Zahl wissenschaftlicher Fragestellungen im Zusammenhang mit Teleoperation beantworten zu können, wird gefordert, dass ein experimenteller Leitstand ein hohes Maß an Modularität und Flexibilität in Bezug auf den physischen wie auch softwareseitigen Aufbau besitzt. Dadurch soll zum einen erreicht werden, dass eine gezielte Variation einer großen Bandbreite an interessierenden Untersuchungsvariablen möglich wird, die potenzielle Einflussfaktoren hinsichtlich Fahrleistung, Workload, Situationsbewusstsein wie auch weiterer, relevanter Konstrukte darstellen. Zum anderen soll dadurch der Gesamtaufbau von experimentellen Leitständen an zukünftige Anforderungen wie auch mögliche, technische Neuentwicklungen flexibel angepasst werden können.

Aus experimentalpsychologischer Sicht wird hierzu gefordert, dass eine gezielte Manipulation interessierender unabhängiger Variablen und damit die Herstellung reproduzierbarer Untersuchungsbedingungen ermöglicht werden. Insbesondere muss dabei mit Blick auf die zu untersuchenden Parameter eine Konfundierung mit potenziellen Störvariablen möglichst vermieden werden, d.h. eine unabhängige Manipulation einzelner Variablen ohne Beeinflussung anderer potenzieller Einflussgrößen (z.B. Variation von Latenz und Jitter jeweils unabhängig voneinander) möglich sein. Zudem wird gefordert, dass eine möglichst fehlerfreie Messung und Aufzeichnung relevanter abhängiger Variablen ermöglicht wird. Unter Berücksichtigung offener Forschungsfragen zu Teleoperatorarbeitsplätzen im Allgemeinen ist hierzu auch erforderlich, dass experimentelle Leitstände die Aufzeichnung unterschiedlicher Maße (z.B. physiologischer Maße wie EEG- und Elektrodermaldaten, Verhaltensmaße wie Eye-Tracking-Daten oder Fahr- und Videodaten etc.) unterstützen, wobei eine synchronisierte Aufzeichnung bzw. eine nachträgliche Synchronisation von Daten unterschiedlicher Quellen mit möglichst geringem Aufwand verbunden sein sollte. Insbesondere muss eine automatisierte, kontinuierliche Aufzeichnung relevanter Fahrdaten erfolgen können, um potenzielle Auswirkungen experimenteller Manipulationen auf die Fahrperformanz auf Basis einschlägiger Maße (z.B. Maße zur Erfassung der Qualität von Quer- und Längsführung) untersuchen zu können. Im Zusammenhang damit muss auch der physische Aufbau des experimentellen Leitstands bzw. die Untersuchungsumgebung so gestaltet bzw. angepasst werden können, dass ggf. auch eine Online-Kodierung bestimmter Variablen (z.B. die Erfassung von Fahrfehlern) durch die Versuchsleitung möglich ist. Insbesondere sollte die verwendete Software eine Synchronisierung automatisiert und händisch erfasster Variablen unterstützen. Hierbei wird jedoch nicht gefordert, dass der Leitstand bestimmte Messinstrumente wie beispielsweise ein EEG-Gerät generell enthalten muss, jedoch eine möglichst einfache Einbindung wie auch Aufzeichnung damit einhergehender Daten ermöglichen soll.

Weiterhin ist mit Fokus auf offene Forschungsfragen und damit im Zusammenhang stehende Konstrukte zu fordern, dass der experimentelle Leitstand mit einem System zur automatisierten Blickerfassung (sog. Eye-Tracking-System) ausgestattet wird. Diese Anforderung

rung erscheint in zweierlei Hinsicht notwendig: Zum einen stellen Blickdaten ein etabliertes Verhaltensmaß zur Erfassung visueller Aufmerksamkeit bzw. Vigilanz sowie von Situationsbewusstsein im Fahrkontext dar, weshalb die Beantwortung konkreter, damit im Zusammenhang stehender Forschungsfragestellungen vom Einbau eines solchen Systems stark profitiert. Zum anderen ergibt sich die Anforderung aus den Mindestanforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze: Hierin wird gefordert, dass ein System zur Aufmerksamkeitsüberwachung der teleoperierenden Person vorhanden ist. Unter diesem Gesichtspunkt können durch den Einbau eines Eye-Tracking-Systems sowohl die Auswirkungen von Systemen zur Aufmerksamkeitsüberwachung untersucht als auch das Eye-Tracking-System selbst zur experimentellen Realisierung und Untersuchung derartiger Driver Monitoring Systeme genutzt werden.

Darüber hinaus wird gefordert, dass ein Pausieren („Einfrieren“) der Gesamtsimulation ermöglicht wird. Hintergrund dieser Anforderung ist, dass in experimentellen Untersuchungen dadurch eine gezielte Befragung von Versuchspersonen über die aktuelle Fahrsituation und damit die Erfassung ihres Situationsbewusstseins anhand verbaler Aussagen unmittelbar in der Situation möglich wird (sog. Freeze-Techniken; Rauch, 2009). Hierbei sollte softwareseitig sichergestellt werden, dass ein entsprechendes Pausieren auch die Aufzeichnung der automatisiert erfassten Daten pausiert, um eine Desynchronisation unterschiedlicher Datenquellen zu verhindern. Zudem wird gefordert, den experimentellen Leitstand mit Mikrofon und Lautsprecher zur Kommunikation zwischen Versuchsperson und Versuchsleitung auszustatten¹⁷.

Weiterhin wird gefordert, dass neben der Kopplung des experimentellen Leitstands mit einem simulierten Fahrzeug die Anbindung an Modell- und Realfahrzeuge unterstützt und ermöglicht wird. Hierunter fällt insbesondere eine entsprechende Gestaltung von hardware- wie auch softwareseitigen Schnittstellen, die eine möglichst einfache Kopplung mit einem Real-/Modellfahrzeug bzw. einem dazugehörigen Gesamtsystem unterstützen.

Schließlich sollten experimentelle Leitstände derart gestaltet werden, dass die Anwendung klassischer Untersuchungsparadigmen (z.B. Zweitaufgabenparadigma) bzw. der Einsatz entsprechender Methoden, die in verkehrspsychologischen Untersuchungen häufig Verwendung finden, unterstützt werden. Die Forderung ergibt sich zum einen aufgrund der Frage, welchen Nebentätigkeiten das Teleoperationspersonal in unterschiedlichen Operationsmodi nachgehen darf bzw. welche Nebentätigkeiten generell auszuschließen sind. Zum anderen werden dadurch Untersuchungen in Bezug auf weitere, interessierende Konstrukte wie beispielsweise der Vigilanz von Teleoperierenden, insbesondere im Teleassistenz Setting, unterstützt. Hierbei wird auch gefordert, dass eine modulare, physische wie softwareseitige Integration von Geräten (z.B. Tablets), die zur Bearbeitung standardisierter Nebentätigkeiten (z.B. n-back Task, Detection Response Task) erforderlich sind, möglich ist und eine einfache Umsetzung bzw. Integration unterstützt wird. Hiermit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass zukünftige Fragestellungen zu Telefahren und Teleassistenz den Einsatz etablierter Forschungsmethoden erforderlich machen können, und damit der Aufwand für entsprechende Anpassungen des experimentellen Leitstands minimiert wird.

¹⁷ Bemerkung: Der Einbau von Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Versuchsleitung und Probanden durch Mikrofone entspricht auch dem Aufbau üblicher Fahrsimulatoren und ist einem reibungslosen Versuchsablauf zuträglich, da beispielsweise zur mündlichen Zwischenbefragung zwischen unterschiedlichen Versuchsfahrten die Teleoperierenden den experimentellen Leitstand nicht verlassen müssen.

Anforderungen an die Variierbarkeit potentieller Einflussfaktoren, Gestaltungsaspekte und deren Ausprägungen

Neben generellen experimentalpsychologischen Forderungen ergeben sich Anforderungen an experimentelle Leitstände aus offenen Forschungsfragen zu potenziellen Einflussfaktoren von Gestaltungsaspekten des Teleoperatorarbeitsplatzes auf Workload, Fahrperformance und Akzeptanz. Zudem lassen sich Anforderungen im Hinblick auf die Ausprägungen einzelner Gestaltungsaspekte bzw. deren Variierbarkeit ableiten.

Ein experimenteller Leitstand sollte grundsätzlich die Bearbeitung von Fragestellungen zu den Operationsmodi Telefahren und Teleassistenz ermöglichen. In diesem Zusammenhang ergibt sich auch die Forderung, dass die Simulation von Fahrzeugen unterschiedlicher Automationsstufen möglich sein muss: Während Szenarien des Telefahrens das manuelle (Level 0) bzw. assistierte Fahren (Level 1 und 2) eines Fahrzeugs betreffen können, setzt die Untersuchung von Teleassistenz Fragestellungen ein Mindestmaß an fahrzeugseitig verfügbarer Automation (Level 4/5) des teleoperierten Fahrzeugs voraus. Demnach ist zur Untersuchung der Wirkung von Telefahren und Teleassistenz wie auch unterschiedlicher Teleassistenz-Konzepte und –Ausprägungen die Simulation ebensolcher Fahrfunktionen des zu steuernden bzw. zu unterstützenden Fahrzeugs notwendig. Weiterhin sollten mit Blick auf Anwendungsfälle des Telefahrens Fahrerassistenzsysteme für die Längs- (bspw. Abstandsregeltempomat, Notbremsassistent) und Querführung (bspw. Spurhalte-, -wechselassistent, Spurwechselwarner) realisiert und deren Verfügbarkeit im simulierten Fahrzeug variiert werden können. Gleichzeitig muss auch die Simulation unterschiedlicher, teleoperierter Fahrzeugtypen, im Speziellen von Pkw und Lkw, realisiert werden können, um die Untersuchung einer möglichst großen Bandbreite an Forschungsfragen zu ermöglichen.

Daneben ergeben sich Forderungen, die sich auf die Variationsmöglichkeiten der Sichtdarstellung und der dazu verwendeten Bildmedien beziehen. Bezüglich der verwendeten Darstellungsmedien wird gefordert, dass der experimentelle Leitstand die Einbindung gängiger Bildschirmarten (LCD, CRT etc.) unterstützt. Dabei sollte auch der Austausch von Displays möglichst einfach realisierbar sein, wodurch auch entsprechende Parameter wie die Abmessungen und Auflösung der verwendeten Displays variiert werden können. Zudem muss die Größe des Sichtfelds eingestellt werden können, wobei eine Abdeckung des Sichtbereichs bis zu 360° erreicht werden soll. Zudem sollten schwenkbare Kameransichten realisiert werden können. Im Speziellen sollte eine zusätzliche Darstellung der Fahrsituation aus der Vogelperspektive ein- und ausgeblendet werden können, um im Rahmen einer systematischen Variation die Untersuchung potenzieller Effekte zu ermöglichen. Aus ähnlichen Gründen sollte die Darstellung von Seiten- und Rückansicht zwischen separaten Bildschirmen und einer in die Frontsicht integrierten Präsentation umgeschaltet sowie die Größe des rückwärtigen Sichtfelds variiert werden können. Zusätzlich sollten experimentelle Leitstände den Einsatz innovativer Displaytechnologien (HMD/AR-/VR-Displays) sowohl als Alternative zur Darstellung auf klassischen Bildschirmen als auch als Darstellungsfläche für zusätzliche Informationen ermöglichen, um den potenziellen Einfluss derartiger Anzeigekonzepte untersuchen zu können¹⁸. Im Zusammenhang damit muss ein experimenteller Leitstand auch die gezielte Manipulation von Bild- und Videoparametern (z.B.

¹⁸ Bemerkung: Mit Blick auf die Konfundierung von Darstellungsmedium und zusätzlich dargestellten Informationen in einschlägigen Studien ist hier insbesondere darauf zu achten, dass der Aufbau eine unabhängige Variation ebendieser Variablen zulässt.

Bildauflösung, -wiederholrate, -kompressionsrate) in der Darstellung der Fahrsituation ermöglichen. Dabei muss auf eine unabhängige Variierbarkeit der einzelnen Parameter geachtet werden, um bei Untersuchung kausaler Fragestellungen die Gefahr potenzieller Alternativerklärung aufgrund von Konfundierungen zu verhindern¹⁹.

Weiterhin muss der technische Aufbau experimenteller Leitstände die Verwendung und möglichst einfache Variation unterschiedlicher Bedienelemente und -konzepte ermöglichen. Zum einen sollte zwischen der Steuerung mittels klassischer Cockpitlelemente (Lenkrad, Fahrpedal, Bremse) und innovativen Bedienelemente (z.B. Joysticks) variiert werden können. Insbesondere mit Blick auf Untersuchungen zur Teleassistenz muss auch eine touchbasierte Auswahl bzw. Bestätigung von Fahrtrajektorien wie auch die Bedienung mit klassischer PC-Tastatur und PC-Maus realisiert werden können. Zum anderen muss für die Bearbeitung der sekundären Fahraufgabe (Steuerung der Lichtanlage, Hupe, Warnblinklicht etc.) zwischen physischen und touchbasierten Bedienelementen gewechselt werden können. Dabei sollte der experimentelle Leitstand softwareseitig derart gestaltet sein, dass im Rahmen der Gestaltung von Versuchsfahrten eine möglichst einfache Verknüpfung zwischen Bedienelement und der zugehörigen Funktion hergestellt werden kann.

In Bezug auf die Geräuscharstellung sollte ein experimenteller Leitstand den Einsatz unterschiedlicher, physischer Ausgabemedien (Lautsprecher, Kopfhörer) sowie deren Austausch bzw. Variation unterstützen. Zudem sollte der dargebotene Frequenzbereich variiert werden können, um Fragestellungen bezüglich des notwendigerweise darzustellenden Frequenzbereichs beantworten zu können. Zudem sollte die Modularität des Systems die Verwendung mehrerer Lautsprecher unterstützen, die softwareseitig getrennt angesteuert werden können, um eine räumliche Verteilung der Geräuschkulisse in der realen Fahrsituation auch im experimentellen Leitstand abbilden und deren potenziellen Einfluss untersuchen zu können.

Mit Blick auf die genannten Anforderungen an Sicht- und Geräuscharstellung sowie Bedienelemente wird jedoch nicht gefordert, dass ein experimenteller Leitstand alle genannten physischen Charakteristika (z.B. physische und touchbasierte Bedienelemente, HMD/AR-/VR-Displays) per se aufweisen muss. Es wird jedoch explizit gefordert, dass der physische wie auch softwareseitige Aufbau eine möglichst einfache Integration und Ansteuerung der genannten Systeme unterstützt, um sie bei Bedarf integrieren zu können. Hierzu müssen notwendige Schnittstellen am experimentellen Leitstand vorhanden sein.

Darüber hinaus sollte ein experimenteller Leitstand eine aktive Manipulation von Latenz und Jitter ermöglichen, um deren Einfluss auf die Fahrleistung und das subjektive Erleben des Teleoperationspersonals untersuchen zu können. Dies sollte getrennt für den Up- (d.h. Steuereingaben vom Leitstand zum Fahrzeug) und Downlink (d.h. Informationsweitergabe vom Fahrzeug zum Leitstand) möglich sein. Mit Blick auf die bisher empirisch ermittelten Latenzgrenzen sollte der Leitstand demnach in der Lage sein, Latenzen von 170 ms, ab der sich erste, negative Einflüsse auf die Fahrleistung zeigen, oder weniger zu simulieren. Gleichzeitig sollen, insbesondere in Bezug auf offene Fragestellungen zur Teleassistenz bzw. der Wirkung kompensatorischer Maßnahmen auch bei Telefahren, vergleichsweise

¹⁹ Bemerkung: In Bezug auf potenzielle Einflüsse durch die Anwendung von Algorithmen, wie bspw. zur Bildkompression und -rekonstruktion oder zur artifizialen Erhöhung der Latenz zur Reduktion des Jitter, wird nicht gefordert, dass diese zwangsläufig in einer echtzeitfähigen Variante implementiert werden müssen, solange die verwendete Darstellung dennoch dem tatsächlichen Ergebnis deren Anwendung entspricht.

hohe Latenzen simuliert werden können. Mit Blick auf den Einfluss von Latenzen und bisher empirisch nicht bestätigter Obergrenzen für unterschiedliche Teleassistenz-Konzepte erscheint auch die Einstellbarkeit höherer Latenzen notwendig. Neben der absoluten Höhe der vorliegenden Latenz sollte ein experimenteller Leitstand auch eine aktive Manipulation des Jitters ermöglichen. Dabei muss eine unabhängige Variierbarkeit der Höhe der Latenz und der Höhe des Jitters möglich sein, um mögliche Interaktionseffekte experimentell untersuchen zu können. Dabei muss sowohl bei simulationsgestützten Untersuchungen als auch bei Verwendung zur Steuerung bzw. Überstützung realer Fahrzeuge eine kontinuierliche Messung der Latenz des verwendeten Systems (sog. Eigenlatenz) möglich sein²⁰ oder es muss zumindest eine ausreichend genaue Abschätzung der systemimmanenten Latenz vorliegen. Da Teleoperation aus physikalischen wie technischen Gründen stets latenzbehaftet ist und die Latenz einen wesentlichen Einflussfaktor für Fahrleistung, Workload wie auch Situationsbewusstsein des Teleoperationspersonals darstellt, wird explizit gefordert, dass experimentelle Leitstände die aktive Manipulation der Latenz sowie die Messung oder zumindest ausreichend genaue Kenntnis von Eigenlatenzen ermöglichen und dafür nicht nur entsprechende Schnittstellen bereitstellen.

Schließlich sollte ein experimenteller Leitstand derart gestaltet werden, dass eine Anbindung bzw. Integration in ein ggf. simuliertes Kontrollzentrum möglich ist. Die Forderung trägt dem Umstand Rechnung, dass ein Teleoperatorarbeitsplatz nicht nur als Einzelsystem, sondern als Teil eines System-of-Systems anzusehen ist, und das Teleoperationspersonal dem Einfluss damit in Verbindung stehender Faktoren (Kommunikation mit Kontrollzentrum o.ä.) unterliegen kann. Dies betrifft zum einen die Möglichkeit der technischen Kopplung des experimentellen Leitstands bzw. die Bereitstellung entsprechender Schnittstellen, die einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen Leitstand und anderen Systemen ermöglicht. Zum anderen werden damit aber auch Schnittstellen und eine entsprechende Ausstattung zur tatsächlichen Kommunikation zwischen Teleoperationspersonal und Leitstellenmitarbeitenden gefordert – wie beispielsweise der physische Einbau eines Mikrofons in den experimentellen Leitstand zur verbalen Kommunikation.

Anforderungen softwareseitige Szenariengestaltung

Neben generellen Anforderungen an die Modularität von experimentellen Leitständen und der gezielten, experimentellen Manipulation interessierender, potenzieller Einflussfaktoren wird für den Aufbau simulationsbasierter experimenteller Leitstände zudem gefordert, dass die verwendete Software die Gestaltung einer großen Bandbreite unterschiedlicher Szenarien für den Einsatz von Teleoperation erlaubt. Neben der bereits geforderten Verfügbarkeit unterschiedlicher zu teleoperierender Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw) fällt hierunter auch die Simulation unterschiedlicher Fahrumgebungen (Autobahn, Landstraße, urbane Gebiete) wie auch unterschiedlicher Verkehrssituationen (z.B. dichter Verkehr, Stausituationen, Wetterlage).

Daneben muss die Gestaltung von Übernahmeszenarien aus unterschiedlichen Automationsgraden (SAE Level 0 bis 4) in Kombination mit verschiedenen Operationsmodi (Telefahren vs. Teleassistenz) ermöglicht werden, was bedeutet, dass die verwendete Software sowohl in der Lage sein muss, unterschiedliche Automationslevel des Fahrzeugs als auch die

²⁰ Bemerkung: Aus technischer Sicht ist die Kenntnis oder Messung der Eigenlatenz auch insofern notwendig, dass diese zur Gesamtlatenz beiträgt. Bei aktiver Manipulation der Latenz ist es daher erforderlich die ohnehin vorliegende, systembedingte Eigenlatenz miteinzubeziehen.

teleoperierte Steuerung bzw. Unterstützung simulieren zu können. Zudem müssen unterschiedliche, reproduzierbare Fahrscenarien (z.B. Übernahmeaufforderung bei Erreichen von Systemgrenzen) gestaltet werden können, wobei die verwendete Software insbesondere auch in der Lage sein muss, den vorübergehenden und dauerhaften Ausfall einzelner Sensorsysteme (Kameras, Umfelderkennung, Vogelperspektive etc.) oder Assistenzsysteme (Spurhalteassistent, Spurwechselwarner, Abstandsregeltempomat) simulieren zu können. Dabei muss die Software ermöglichen, dass diese und andere Ereignisse (z.B. Erreichen von Systemgrenzen) sowohl automatisiert als auch durch die Versuchsleitung (z.B. durch entsprechende Bedienelemente im Versuchsleitungs-GUI) ausgelöst werden können.

5.2.3 Anforderungen an Human-Machine-Interfaces

Weiterhin werden spezielle Anforderungen an die Gestaltung des Human-Machine-Interfaces (HMI) von experimentellen Leitständen gestellt. Diese betreffen zum einen das HMI, das vom Teleoperationspersonal während der Fahrt verwendet wird. Zum anderen ergeben sich aber auch spezielle Anforderungen an das HMI, das seitens der Versuchsleitung zur Gestaltung, Durchführung und Steuerung von Versuchen verwendet wird.

Anforderungen an HMIs für Teleoperationspersonal

Besondere Anforderungen ergeben sich an die Gestaltungsmöglichkeiten des durch die Teleoperierenden verwendeten HMI. Diese betreffen sowohl die grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface; GUI) als auch die zu deren Bedienung verwendeten Bedienelemente.

Die grafische Benutzeroberfläche muss die Darstellung wesentlicher, für die sichere Steuerung bzw. Unterstützung des Fahrzeugs durch die teleoperierende Person relevanter Informationen (aktuelle Geschwindigkeit, Geschwindigkeitslimits und Latenz, Reichweite, Status der Lichtanlage) aufweisen. Hierunter fallen insbesondere auch Informationen über die Aktivität ggf. vorhandener Assistenzsysteme (Spurhalte-/wechselassistent, Notbremsassistent, Abstandsregeltempomat) als durchgehende Anzeige sowie die Anzeige über den Ausfall bestimmter Sensorsysteme (Kameras, Abstandssensoren, ggf. LIDAR). Hierbei muss die technische Gestaltung auch die Variierbarkeit der Anzeige der einzelnen Informationen im Sinne einer experimentellen Manipulation ermöglichen, um potenziell vorhandene kausale Effekte aufdecken zu können. Die technische Umsetzung sollte dabei die gezielte Manipulation einzelner Informationen zur Untersuchung von Wirkfaktoren als auch die Variierbarkeit der Gesamtanzeige zum Vergleich verschiedener Gesamtanzeige-konzepte ermöglichen.

Zudem sollte das GUI die optische Anzeige von Informationen unterstützen, die mit der Verwendung prädiktiver Displays einhergehen – wie z.B. die optische Anzeige der bei einer Notbremsung noch durchfahrenen Strecke (Chucholowski, 2015) –, um den Einfluss kompensatorischer Maßnahmen untersuchbar zu machen. Auch in diesem Zusammenhang soll eine möglichst einfache Variierbarkeit (z.B. Zu-/Abschalten der kompensatorischen Maßnahme) möglich sein.

Daneben muss bei der Gestaltung von experimentellen Leitständen auf eine möglichst einfache Variierbarkeit der Bedienelemente zur Steuerung der bzw. zur Interaktion mit der grafischen Bedienoberfläche geachtet werden. Neben dem Einsatz klassischer Bedienelemente wie PC-Maus, Tastatur und Hard-Keys soll auch der Einsatz touchbasierter Bedien-

elemente unterstützt werden. Die Forderung ergibt sich zum einen daraus, dass der Einfluss unterschiedlicher Bedienkonzepte bzw. experimenteller Settings untersuchbar gemacht werden soll. Zum anderen ist sie notwendig, da die unterschiedlichen Teleoperationsmodi (Telefahren vs. Teleassistenz) unterschiedliche Bedienkonzepte erforderlich machen. Entsprechend muss auch eine softwareseitige einfache Zuordnung zwischen (physischen) Bedienelementen und den adressierten Funktionen ermöglicht werden. Zusätzlich sollte die physische wie softwareseitige Gestaltung die Einbindung bzw. Verwendung neuartiger Bedienkonzepte wie bspw. Gesten- und sprachbasierter Bedienungsansätze unterstützen²¹.

Schließlich sollen experimentelle Leitstände den Einsatz und die Verwendung multimodaler Anzeigesysteme unterstützen. Die Forderung ergibt sich aus bisher unbeantworteten Forschungsfragen zur Verwendung multimodaler Displays im Teleoperationskontext, insbesondere im Hinblick auf die Gestaltung kompensatorischer Maßnahmen. Für den technischen Aufbau von experimentellen Leitständen wird daher zum einen gefordert, dass Aktoren für die Bereitstellung zusätzlicher vibrotaktile, visueller und auditiver Informationen verbaut werden bzw. ein nachträglicher Einbau derartiger Aktoren durch den Aufbau unterstützt wird. Zum anderen wird gefordert, dass die softwareseitige Gestaltung eine möglichst einfache An- und Einbindung sowie Ansteuerung der physischen Bauteile ermöglicht. Daneben wird gefordert, dass die konzeptionelle Gestaltung von experimentellen Leitständen die Bereitstellung von vestibulären Informationen durch bzw. die Anbindung an Bewegungssysteme unterstützt²².

Anforderungen an das GUI zur Versuchsdurchführung

Neben bestimmten Anforderungen an das GUI, mit dem die Teleoperierenden unmittelbar in Kontakt kommen, werden weitere Anforderungen an das GUI gestellt, das seitens der Versuchsleitung für die Durchführung von Untersuchungen verwendet wird. Dabei haben diese Anforderungen das Ziel, die Gestaltung, Durchführung und Steuerung von wissenschaftlichen Untersuchungen zu ermöglichen und zu vereinfachen.

Zunächst soll die Gestaltung des GUI zu einer möglichst reibungslosen Durchführung von Untersuchungen beitragen. Hierzu muss das GUI zum einen derart konzipiert sein, dass die experimentelle Manipulation interessierender Faktoren bzw. die Auswahl entsprechender Ausprägungen (z.B. in Form einer entsprechenden Auswahlmaske) möglichst vereinfacht wird.

Daneben soll das GUI derart gestaltet werden, dass eine individuelle Anpassung der grafischen Bedienoberfläche durch die Versuchsleitung möglich wird. Hierunter fällt auch die Auswahl und kontinuierliche Darstellung relevanter Messgrößen (z.B. Fahrdaten) in unterschiedlichen Formaten (z.B. als numerischer Wert, als Plot über die Fahrzeit) unmittelbar während der Versuchsfahrt wie auch die Möglichkeit, unterschiedliche, zeitlich variierende Signale „übereinander“ zu legen. Zudem soll eine einfache Auswahl der aufzuzeichnenden Daten möglich sein.

²¹ Bemerkung: Hierbei wird nicht explizit gefordert, dass derartige Systeme im Aufbau des experimentellen Fahrstands per se vorhanden sind, diese aber physisch wie auch softwareseitig mit möglichst geringem Aufwand eingebunden werden können.

²² Bemerkung: Hierbei wird nicht explizit gefordert, dass experimentelle Fahrstände ein funktionsfähiges Bewegungssystem besitzen müssen, sondern lediglich, dass die konzeptuelle Gestaltung der experimentellen Fahrstände grundsätzlich die technische Anbindung und Verwendung eines solchen Systems unterstützt.

Zusätzlich sollte das GUI eine Anzeige der aktuellen Fahrsituation und eine Anzeige für die Kamerasicht auf die Versuchsperson beinhalten. Dies erscheint notwendig, um Online-Beobachtung durch die Versuchsleitung während der durchgeführten Versuchsfahrten zu ermöglichen. Zudem erscheint eine Sicht auf die aktuelle Versuchsperson sinnvoll, um deren Zustand während der Fahrt (z.B. äußere Symptome von Bewegungskrankheit) bewerten zu können. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass eine Aufzeichnung von Videodaten, auf denen Personen zu erkennen sind, nur dann erlaubt ist, wenn diese im Vorfeld der Untersuchung darüber informiert wurden und eine schriftliche Einwilligung in die Aufzeichnung vorliegt (sog. Informed Consent)²³.

Für den Fall einer simulationsbasierten Teleoperation wird gefordert, dass es die Möglichkeit gibt, ganze Fahrszenarien bzw. Fahrten mit entsprechend vorgegebenen Variablenausprägungen zu erstellen und im Rahmen der Versuchsdurchführung als Ganzes laden zu können. Dadurch wird eine möglichst einfache Reproduzierbarkeit von experimentellen Untersuchungsbedingungen erreicht. Weiterhin sollte das GUI bei Kopplung mit simulierten Fahrzeugen Bedienelemente zum Pausieren (z.B. zwecks Befragung zum Situationsbewusstsein) bzw. Beenden (z.B. wenn ein Abbruch des Versuchs notwendig wird) der aktuellen Simulation aufweisen.

5.2.4 Übersicht über Anforderungen an experimentelle Teleoperatorarbeitsplätze

Tab. 15 gibt einen Überblick über die Anforderungen an experimentelle Leitstände.

Anforderungstyp	Anforderung	Erläuterung
Experimentalpsychologische Anforderungen	Systematische Variierbarkeit relevanter Faktoren	Aktive, systematische und unabhängige Manipulierbarkeit von unabhängigen Variablen (z.B. Latenz, Jitter) zur Herstellung reproduzierbarer Untersuchungsbedingungen
	Hohe Modularität und Flexibilität in Bezug auf zu untersuchende Maße	Möglichst einfache Einbindung, Integration und Erfassung unterschiedlicher Untersuchungsmaße (z.B. EEG, Eye-Tracking) und Unterstützung in der synchronisierten Erfassung der resultierenden Daten
	Automatisierte Aufzeichnung von Untersuchungsdaten	Automatisierte, möglichst fehlerfreie Aufzeichnung von Untersuchungsdaten
	Synchronisierung von Daten aus unterschiedlichen Quellen	Unterstützung synchronisierter Aufzeichnung von Daten unterschiedlicher Quellen bzw. derart, dass eine nachträgliche Synchronisierung vereinfacht wird

²³ Bemerkung: Liegt kein Informed Consent vor, darf dagegen keine Aufzeichnung und Speicherung der Kameradaten erfolgen, sondern die Videodaten lediglich unmittelbar während der Fahrt angezeigt werden. Letzteres erscheint trotzdem notwendig, um während des Versuchs den Zustand der Versuchspersonen einschätzen zu können.

		Unterstützung in der Synchronisierung von automatisiert erfassten und händisch-/online-kodierten Untersuchungsdaten
	Integration eines Eye-Tracking-Systems	Einbau eines Eye-Tracking-Systems mit Blick auf offene Forschungsfragen zu Situationsbewusstsein und Vigilanz von Teleoperierenden wie auch zur experimentellen Realisierung von Driver-Monitoring-Systemen
	Möglichkeit des „Einfrierens“ der Fahrsituation bei Kopplung mit simulierten Fahrzeugen	Anhalten der aktuellen Gesamtsimulation zum Zweck der gezielten Befragung von Versuchspersonen über die aktuelle Fahrsituation zur Erfassung des Situationsbewusstseins (sog. Freeze-Techniken)
	Möglichkeit zur Kopplung mit sowohl simulierten als auch realen und Modellfahrzeugen	Bereitstellung physischer wie softwareseitiger Schnittstellen zur Kopplung des experimentellen Leitstands mit simulierten wie auch realen und Modellfahrzeugen
	Möglichkeit zum einfachen Einsatz klassischer Untersuchungsparadigmen der Verkehrspsychologie	Bereitstellung physischer wie softwareseitiger Schnittstellen für den Einsatz von Methoden (z.B. n-back Task, Detection Response Task) und Paradigmen (z.B. Zweitaufgabenparadigma) zur Untersuchung relevanter Konstrukte (z.B. Vigilanz der teleoperierenden Person)
	Möglichkeit der simulationsgestützten Untersuchung von Telefahren- und Teleassistenten-Fragestellungen	Simulation unterschiedlicher Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw) Simulation unterschiedlicher Automationsgrade für Telefahren (Level 0-2) und Teleassistenten-Fragestellungen (Level 4-5) Simulation unterschiedlicher Assistenzsysteme (Spurhalte-, -wechsel-, Notbremsassistent) Simulation von Sensor- und Systemausfällen, automatisiert und Versuchsleitungsgetriggert
	Variierbarkeit der Sichtdarstellung	Unterstützung gängiger Bildschirmtechnologien (LCD, CRT) Bereitstellung von physischen wie softwareseitigen Schnittstellen zur Verwendung innovativer Bildschirmtechnologien (HMD/AR-/VR-Displays)

		<p>Variierbarkeit des Sichtbereichs bis zu 360°-Rundumsicht und Realisierung schwenkbarer Kamerasichten</p> <p>Möglichkeit zur zusätzlichen Darstellung der Fahrsituation aus Vogelperspektive</p> <p>Möglichkeit zur systematischen Variation von Bild- und Videoparameter (z.B. Bildauflösung, -rate, -kompression)</p> <p>Möglichkeit und einfache Variierbarkeit zwischen in die Fronsticht integrierter Rückansicht und Darstellung der Rückansicht auf gesondertem Anzeigemedium</p>
	Variierbarkeit der Bedienelemente	<p>Variierbarkeit zwischen Steuerung mit klassischen Cockpитеlementen (Lenkrad, Fahrpedal, Bremse) und innovativen Steuerkonzepten (z.B. Joystick) für Telefahren wie auch PC-Maus, Tastatur und touchbasierten Elementen für Teleassistenz</p> <p>Variierbarkeit zwischen physischen und touchbasierten Bedienelementen für Bearbeitung sekundärer Fahraufgabe (Steuerung der Lichtanlage, Hupe, Warnblinkanlage etc.)</p> <p>Softwareseitig möglichst einfache Verknüpfbarkeit von Bedienelement und zugehörigen Funktionen</p>
	Variierbarkeit der Geräuschkulisse	<p>Variierbarkeit des dargebotenen Frequenzbereichs</p> <p>Unterstützung der Verwendung und Variation unterschiedlicher physischer Ausgabemedien (Lautsprecher, Kopfhörer)</p> <p>Unterstützung der Ansteuerung mehrerer Lautsprecher zur Abbildung der räumlichen Verteilung der Geräuschkulisse</p>
	Variierbarkeit von Latenz und Jitter	<p>Variierbarkeit (getrennt für Up-/Downlink) der Latenz beginnend bei einer Untergrenze von 170 ms oder weniger</p> <p>Variierbarkeit der Variabilität der Latenz (sog. Jitter)</p> <p>Absolute Höhe der Latenz und Jitter unabhängig voneinander manipulierbar</p> <p>Bereitstellung einer Schnittstelle zum möglichst einfachen Auslesen, Darstellen</p>

		und kontinuierlichen Aufzeichnen der aktuellen Latenz sowohl bei Kopplung mit simulierten als auch mit realen Fahrzeugen
	Anbindung und Integration an simuliertes und reales Kontrollzentrum	<p>Möglichkeit zur Anbindung und Integration des experimentellen Leitstands an simuliertes und reales Kontrollzentrum durch Bereitstellung physischer Schnittstellen zum bidirektionalen Datenaustausch</p> <p>Ausstattung zur verbalen Kommunikation zwischen Teleoperations- und Leitstellenpersonal (z.B. Einbau von Mikrofon und Lautsprechern)</p>
Anforderungen an HMI für Teleoperationspersonal	Darstellung relevanter Informationen und Variierbarkeit	<p>Variierbare Darstellung von zur sicheren Steuerung bzw. Überwachung des Fahrzeugs notwendiger Informationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aktuelle Geschwindigkeit und aktuelles Geschwindigkeitslimit • Aktuelle Latenz • Aktuelle Reichweite • Aktueller Status der Lichtanlage <p>Durchgehende Anzeige ggf. vorhandener, aktiver Assistenzsysteme</p> <p>Durchgehende Anzeige ausgefallener Sensorsysteme (Kameras, Abstandssensoren, LIDAR)</p> <p>Unterstützung der Anzeige von Informationen bzgl. kompensatorischer Maßnahmen (z.B. prädiktiver Displays) sowie deren aktiver Manipulation als Untersuchungsbedingung</p> <p>Möglichkeit zur systematischen, unabhängigen Variierbarkeit der Anzeige der einzelnen, aufgeführten Informationen</p>
	Variierbarkeit des Grads individueller Konfigurierbarkeit	<p>Variierbarkeit der individuellen Einstellbarkeit des GUI durch die teleoperierende Person</p> <p>Möglichkeit zur Gestaltung von GUIs durch die Versuchsleitung, innerhalb derer die Teleoperierenden zwischen verschiedenen, vorgefertigten Ansichten wechseln können.</p>

	Variierbarkeit der Bedienelemente zur Steuerung bzw. Interaktion mit dem GUI	<p>Unterstützung der Variierbarkeit unterschiedlicher Bedienelemente (PC-Maus, -Tastatur, Hard-Keys, touchbasierte Bedienelemente)</p> <p>Einfache, softwareseitige Verknüpfbarkeit zwischen (physischen) Bedienelementen und der adressierten Funktion</p> <p>Physische wie softwareseitige Unterstützung und Bereitstellung von Schnittstellen zur Verwendung neuartiger (z.B. gesten- und sprachbasierter) Bedienelemente</p>
	Möglichkeit zum Einsatz multimodaler Anzeigesysteme	<p>Unterstützung des Einbaus bzw. Nachrüstens zusätzlicher vibrotaktiler, visueller und auditiver Elemente durch Bereitstellung entsprechender Schnittstellen</p> <p>Möglichst einfache, physische wie softwareseitige An- und Einbindung der genannten Elemente</p> <p>Bereitstellung von Schnittstellen zur potenziellen Integration von Bewegungssystemen</p>
Anforderungen an HMI zur Versuchsdurchführung	Möglichst einfaches Einstellen und Auswählen von Untersuchungsbedingungen	<p>Möglichst einfache Auswahl bzw. Variation experimenteller Untersuchungsbedingungen (z.B. in Form einer Auswahlmaske)</p> <p>Möglichkeit zur Gestaltung ganzer Fahr-szenarien bzw. Untersuchungsfahrten mit vorselektierten Faktorausprägungen</p>
	Individuelle Anpassbarkeit der GUI	<p>Auswahl und kontinuierliche Darstellung relevanter Messgrößen (z.B. Fahrdaten) in unterschiedlichen Formaten (z.B. numerische Werte, als Plot über die Fahrzeit) während der Fahrt</p> <p>Synchronisierte Darstellung unterschiedlicher, zeitlich variierender Signale</p> <p>Bedienelemente zum Starten, Pausieren und Beenden der Simulation</p>
	Anzeige der aktuellen Fahrsituation und Kamerasicht auf Versuchspersonen	<p>Anzeige der aktuellen Fahrsituation innerhalb des GUI zur gezielten Online-Beobachtung durch die Versuchsleitung</p> <p>Kamerasicht auf die aktuelle Versuchsperson zwecks Einschätzung des Zustands</p>

		(z.B. äußere Symptome von Bewegungs- krankheit)
--	--	--

Tab. 15: Übersicht über Anforderungen an experimentelle Leitstände.

6 Technische Anforderungen an einen experimentellen Leitstand

Aus den experimentalpsychologischen Anforderungen (Kapitel 5.2) und basierend auf den Erkenntnissen der Literaturanalyse (Kapitel 2) und den abgeleiteten Mindestanforderungen eines Leitstands (Kapitel 4.2) können technische Anforderungen an einen experimentellen Leitstand abgeleitet werden.

6.1 Anforderungen an den Hardwareaufbau

Die Anforderungen an die Hardware (z.B. Displays, Steuerungsmöglichkeiten) basieren auf der Vorgabe einer nutzerfreundlichen Bedienbarkeit und einer umfassenden Variabilität, um die flexible Anpassung auf neue Fahrzeugkonzepte und zugehörige Forschungsfragen zu erlauben (vgl. Kapitel 5.2).

6.1.1 Leitstand

Um mit dem Aufbau realitätsnahe Untersuchungsbedingungen zu bieten, soll ermöglicht werden, die definierten Mindestanforderungen für ideal-typische Teleoperatorarbeitsplätze einzustellen. Das Einstellen der Parameter aus den Mindestanforderungen ermöglicht zum einen deren empirische Überprüfung und dient zum anderen dazu, eine Referenz bzw. „Ground Truth“ erheben zu können. Gegen diese Referenz können andere Systemausprägungen verglichen werden (z.B. Auswirkungen eines erweiterten bzw. reduzierten Sichtbereichs). Weiterhin können aus Literatur abgeleitete und teilweise aus anderen Forschungsbereichen stammende Mindestanforderungen evaluiert und Empfehlungen auf Basis der empirisch ermittelten Daten angepasst werden. Für Mindestanforderungen, bei denen zwischen Telefahren und Teleassistenz differenziert wurde, kommen die Telefahren-Anforderungen zum Tragen, da diese üblicherweise über die Anforderungen für Teleassistenz hinausgehen und entsprechende Fälle vom experimentellen Leitstand abgedeckt sein sollten. Um experimentelle Variation über die Mindestausprägung hinaus zu erlauben, werden entsprechende Erweiterungs- bzw. Anpassungsmöglichkeiten gefordert (z.B. höhere oder niedrigere Bildrate als Minimalanforderung). Zur Erfassung der identifizierten Evaluationsparameter ist entsprechende Messtechnik und deren technische Integration vorzusehen.

Für einen experimentellen Leitstand werden somit Anforderungen aus den Kapiteln 4 und 5 zusammengeführt. Dadurch ergeben sich vor dem Hintergrund umfassender Flexibilität und Variierbarkeit für einen experimentellen Leitstand folgende Rahmenbedingungen und Anforderungen (Tab. 16):

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Leitstand <i>(je nach Untersuchungsziel konfigurierbar)</i>	Mockup	Generischer Aufbau
	Primäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	Fahrzeugcockpitähnlicher Aufbau (Lenkrad, Pedalerie) oder vergleichbares System Physisches Bedienelement zur Auslösung eines Minimal Risk Manuevers
	Sekundäre Bedienelemente und ihre Umsetzung	Bedienelemente für <ul style="list-style-type: none"> • Fahrtrichtungsanzeiger + Warnblinker • Licht (inkl. Fernlicht, Nebelscheinwerfer, etc.) • Hupe • Feststellbremse Umsetzung durch physische oder touchbasierte Bedienelemente
Sichtdarstellung <i>(je nach Untersuchungsziel konfigurierbar)</i>	Bildmedium	Klassische Bildschirm€
	Reflexionen	Reflexionsfreie Anzeigeoberfläche (ggf. über Standort sicherzustellen)
	Horizontaler Sichtbereich	Mindestens ²⁴ 180°
	Vertikaler Sichtbereich	Mindestens 40°
	Bildwiederholfrequenz des darstellenden Geräts	Mindestens 60 Hz
	Innenspiegel	Mindestens 20° bei Pkw
	Außenspiegel	Mindestens 12° bei Pkw
	Darstellung der rückwärtigen Sicht	Darstellung auf separaten Displays oder Einbettung in Frontsicht (nur dann,

²⁴ Zunächst muss die Hardware als Basisausprägung das Einstellen der Mindestanforderungen ermöglichen, um – wie zuvor beschrieben – das Ermitteln einer Baseline für weitere Versuche zu erlauben. Daher ist diese Ausprägung *mindestens* zu erfüllen. Sollen darüberhinausgehende Ausprägungen untersucht werden, z.B. ein erweiterter Sichtbereich, kann eine Erweiterung der Hardware über die Mindestanforderungen hinaus nötig werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Untersuchung reduzierter Ausprägungen mit einer Hardware auf Niveau der Mindestanforderungen immer möglich ist (z.B. softwareseitiges Reduzieren des Sichtbereichs, auch wenn die Hardware die geforderten 180° abdeckt).

		wenn dadurch Mindestanforderungen an horizontalen und vertikalen Frontsichtbereich weiterhin erfüllt bleiben)
	Darstellbarkeit zusätzlicher Sichten	Darstellung (z.B. von Fahrzeugumfeld aus Vogelperspektive, Navigationskarte) auf separaten Displays oder Einbettung in Frontsicht (nur dann, wenn dadurch Mindestanforderungen an horizontalen und vertikalen Frontsichtbereich weiterhin erfüllt bleiben)
Geräuscharstellung <i>(je nach Untersuchungsziel konfigurierbar)</i>	Ausgabegerät	Lautsprecher oder Kopfhörer
	Frequenzbereich	Ausreichend, um sehr tiefe bis sehr hohe Frequenzen abzubilden (menschlicher Hörbereich: ca. 20 Hz – ca. 20 kHz)
	Lärmbeurteilungspegel	Maximal 70 dB(A)

Tab. 16: Anforderungen für den Hardwareaufbau eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes.

6.1.2 Versuchsleitungsplatz

Ergänzend zu den Anforderungen an den Leitstand selbst werden im Folgenden die Anforderungen an einen Versuchsleitungsplatz dargestellt. Von diesem Arbeitsplatz aus kann eine versuchsleitende Person den Versuchsbetrieb steuern und überwachen.

Der Versuchsleitungsplatz wird als Bildschirmarbeitsplatz gestaltet und besteht aus (Schreib-)Tisch und Schreibtischstuhl, einem oder mehreren Monitoren sowie Tastatur und Maus als Eingabekomponenten und einem Headset, um mit anderen Versuchsbeteiligten (teleoperierende Person, ggf. Sicherheitsperson – siehe Kapitel 6.4) zu kommunizieren.

Die Anzahl der Bildschirme ist dem Untersuchungsziel bzw. dem Gesamtsetup anzupassen. Die Anzahl und Größe der Bildschirme muss ausreichen, um der Versuchsleitung eine Mitschau dessen, was die Versuchsperson sieht, zu ermöglichen. Dabei kann die Mitschau im Vergleich zur Originaldarstellung skaliert (verkleinert) werden. Die Anzahl der Bildschirme kann reduziert werden, wenn der Versuchsleitungsplatz so positioniert ist, dass die Versuchsleitung die Bildschirme des experimentellen Leitstands direkt einsehen kann und somit die Notwendigkeit einer Mitschau wegfällt.

Zweck des Versuchsleitungsplatzes ist in erster Linie die Möglichkeit zur Steuerung des Versuchs. D.h. die Versuchsleitung kann Versuche von hier aus starten und beenden und ggf. Versuchsparameter beeinflussen. Darüber hinaus können über die kontinuierliche Datenaufzeichnung hinaus bspw. Einzelereignisse dokumentiert werden.

Im Rahmen der Versuchsüberwachung hat die Versuchsleitung die Möglichkeit, ein MRM auszulösen bzw. einen Not-Aus-Schalter zu betätigen und damit alle anderen Eingaben zu übersteuern. Je nach Versuchsgestaltung kann ggf. auch ein selektives Übersteuern von Längs- und Querführung ermöglicht werden.

Die Datenübertragung zwischen Versuchsleitungsplatz und experimentellem Leitstand erfolgt bevorzugt kabel-/netzwerkgebunden, um Latenzen und Verbindungsabbrüche zu minimieren, sie kann bei Sicherstellen einer stabilen Verbindung auch drahtlos per WLAN erfolgen.

Tab. 17 fasst die Anforderungen an den Versuchsleitungsplatz zusammen.

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Geometrie	(Schreib-)Tisch/Bildschirmarbeitsplatz	Schreibtisch Schreibtischstuhl
	Anzeigekomponenten	Bildschirm€
	Eingabegeräte	Maus und Tastatur Ggf. Touchpad Headset
Bereitgestellte Funktionen	Versuchssteuerung	Starten und Beenden einer Versuchsfahrt Beeinflussung des Versuchs Logging (z.B. Notizen zu Einzelereignissen)
	Überwachung/Sicherheitsfunktion	Not-Aus Evtl. Möglichkeit zum Übersteuern von Längs- und Querführung
Dargestellte Informationen	Fahrzeug/Fahrsituation	Mitschau: Versuchsleitung sieht gleiche Bilder wie Teleoperationspersonal, ggf. kleiner/mit geringerer Auflösung (alternativ: Bildschirme können vom Versuchsleitungsplatz aus direkt beobachtet werden) Fahrzeuginformationen (z.B. Geschwindigkeit, Reichweite, Ausfall von Systemen...)
	Teleoperationspersonal	Latenz zwischen Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz Eingaben des Teleoperationspersonals Videobild des Teleoperationspersonals
Verbindung zum Leitstand	Datenübertragung	Idealerweise kabel-/netzwerkgebunden Alternativ: Drahtlos (WLAN)

Tab. 17: Anforderungen an den Versuchsleitungsplatz.

6.2 Anforderungen an Software und Bedienkonzept

Auch die Anforderungen an die Software (z.B. GUI, Funktionalität) haben eine nutzungsfreundliche Bedienbarkeit und eine breite Variabilität zum Ziel, um auf diese Weise eine Vielzahl von Forschungsfragen untersuchen und beantworten zu können. Im Folgenden wird unterschieden zwischen Anforderungen an die Bedienbarkeit des Aufbaus (Interaktion zwischen Bedienenden und experimentellem Leitstand) und an Funktionalitäten, die die Software des (ggf. simulierten) teleoperierten Fahrzeugs und des experimentellen Leitstands betreffen.

Für die Bedienung des experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes im Versuchsbetrieb ergeben sich folgende Anforderungen (Tab. 18):

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Graphische Benutzeroberfläche <i>(je nach Untersuchungsziel konfigurierbar)</i>	Eingabeinstrument	Touchbasierte Steuerung
	Bildrate (videobezogen)	Mindestens 10 fps (im Mittel bei ca. 24 fps)
	Dargestellte Informationen	Höhe der aktuellen Latenz Aktuelle Geschwindigkeit Aktuelles Geschwindigkeitslimit Fahrzeugzustand <ul style="list-style-type: none"> • Reichweite • Fahrtrichtungsanzeiger (an/aus) • Warnblinker • Licht (an/aus) • Fernlicht (an/aus) Ausfall von Sensoren Ausfall von Unterstützungssystemen
	Sichthilfen/Darstellung zusätzlicher Sichten	Anzeige aktueller Trajektorie in Front- und Rückansicht abhängig von aktueller Fahrtrichtung Darstellung zusätzlicher Sichten (z.B. Fahrzeugumfeld aus Vogelperspektive)

Tab. 18: Anforderungen an Bedien- und Konfigurierbarkeit eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes.

An das (ggf. simulierte) teleoperierte Fahrzeug und den experimentellen Leitstand werden folgende softwarebezogene Anforderungen gestellt (Tab. 19):

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Datenaufzeichnung <i>(je nach Untersuchungsziel zuschaltbar)</i>	Kontinuierliche Erfassung teleoperationsbezogener Daten	Videoaufzeichnung der Fahrsituation Fahrdatenaufzeichnung Bedieneingaben
Unterstützungssysteme <i>(je nach Untersuchungsziel umzusetzen und entsprechend zuschaltbar)</i>	Sicherheitssystem für Verbindungsabbruch	System, das das Fahrzeug bei Verbindungsabbruch bzw. zu hoher Latenz in einen sicheren Zustand überführt (Minimal Risk Maneuver)
	Unterstützung der Längsführung	z.B. ACC, Notbremsassistent
	Unterstützung der Quersicherung	z.B. Spurverlassenswarner, Spurhalteassistent
Untersuchungswerkzeug	Unterstützung bei der Absicherung	z.B. Spurwechselwarner
	Modularität und Flexibilität in Bezug auf zu untersuchende Maße	Möglichkeit zur bedarfsgerechten Integration von Messwerkzeugen (z.B. EEG, Eye-Tracking)
Forschungsinstrument	Synchronisierung von Daten aus unterschiedlichen Quellen	Unterstützung synchronisierter Aufzeichnung von Daten unterschiedlicher Quellen bzw. Vorbereitung einer einfachen nachträglichen Synchronisierung Unterstützung in der Synchronisierung von automatisiert erfassten und händisch/online kodierten Untersuchungsdaten
	Möglichkeit zum einfachen Einsatz klassischer Untersuchungsparadigmen der Verkehrspsychologie	Bereitstellung physischer wie softwareseitiger Schnittstellen für den Einsatz von Methoden (z.B. n-back Task, Detection Response Task) und Paradigmen (z.B. Zweitaufgabenparadigma) zur Untersuchung relevanter Konstrukte (z.B. Vigilanz von Teleoperationalpersonal)

Tab. 19: Anforderungen an die Software von teleoperiertem Fahrzeug und experimentellem Leitstand.

6.3 Technische Schnittstelle zwischen Leitstand und Fahrzeug

Weiterhin ist die technische Schnittstelle zwischen Leitstand und Fahrzeug zu spezifizieren. Diese erlaubt die Beobachtung und Steuerung (a) der lateralen und longitudinalen Dynamik des Fahrzeugs (Lenkung, Beschleunigung, Verzögerung), (b) der Sekundärfunktionen wie bspw. Hupe oder Licht, (c) des Kamerabilds, der Fahrdaten und Zustandsdaten

und (d) des Ein- und Ausleitens der Teleoperation. Durch geeignete Gestaltung wird ermöglicht, die Schnittstelle zu beeinflussen, um z.B. Sensorausfälle oder verschiedene Latenzzeiten zu untersuchen.

Zusätzlich zu Leitstand und Fahrplattform werden die technischen Anforderungen an die Kommunikationswege zwischen beiden Einheiten ermittelt. Dabei stehen die technische Umsetzung unter Berücksichtigung der im realen Straßenverkehr zukünftig verfügbaren Technologien sowie insbesondere die Sicherheit bei der Datenübertragung im Vordergrund.

Es lassen sich folgende Anforderungen herleiten (Tab. 20):

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Kommunikationsverbindung	Latenz <i>(je nach Untersuchungszweck konfigurierbar/variabel)</i>	Möglichkeit der Untersuchung verschiedener Latenzen ab ca. 100ms (in Abhängigkeit von der Untersuchungsfrage auch Variation getrennt für die Übertragungsrichtung)
	Jitter	Latenz kann während der laufenden Teleoperation variiert werden
	Kommunikation mit Dritten <i>(falls zutreffend)</i>	Möglichkeit zur Kommunikation zwischen Insassen und teleoperierender Person sowie Kontrollzentrum
Datensicherheit	Insbesondere bei kabelloser Datenübertragung (z.B. über das Mobilfunknetz)	Verhindern unbefugten Zugriffs und Manipulation von Daten → Heranziehen einschlägiger Standards wie ISO/SAE 21434 und UNECE R 155

Tab. 20: Anforderungen an die Schnittstelle zwischen teleoperiertem Fahrzeug und experimentellem Leitstand.

6.4 Modulare Fahrplattform

Die technische Spezifikation umfasst neben dem Leitstand auch eine modulare Fahrplattform, die sowohl über den Teleoperatorarbeitsplatz bzw. Leitstand als auch über eine separate Steuerungseinheit (z.B. von einer Sicherheitsperson) sicher und zuverlässig gesteuert werden kann.

Für eine solche Fahrplattform ist eine große Bandbreite an Konzepten denkbar. Neben einer stark an reale Fahrzeuge und deren Maße angelehnte Plattform könnten auch skalierte Konzepte zum Einsatz kommen.

- Der Einsatz solcher teleoperierten Modellfahrzeuge bietet einige Vorteile, wie z.B. geringeren Platzbedarf, um Fahrmanöver durchzuführen, ggf. sogar in Hallen/Innenräumen. Dadurch können Versuche unabhängiger von der Verfügbarkeit von Teststrecken und von Umwelteinflüssen (Lichtverhältnisse, Wetter) durchgeführt werden.

- Plattformen in realgetreuer Größe bieten zum einen den Vorteil, dass bei der Auslegung, Durchführung von Versuchen und Auswertung keine Skalierung relevanter Größen stattfinden muss. Zum anderen kann ggf. vorhandene Infrastruktur (Fahrstreifenmarkierungen auf Teststrecken, Umgebungsfahrzeuge, Verkehrszeichen etc.) genutzt werden und muss nicht aufwändig in skaliertem Maßstab nachgebildet werden. Der Einsatz von Fahrplattformen in realgetreuer Größe ist sowohl auf der Teststrecke als auch im Realverkehr denkbar.

Für beide Ausprägungen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen, weshalb diese im Folgenden in zwei getrennten Abschnitten (6.4.1 und 6.4.2) beschrieben werden. Da unabhängig von der Skalierung je nach Untersuchungsziel und -umgebung Anforderungen in der Regel sehr unterschiedlich ausfallen, können diese häufig nicht konkret formuliert werden, sondern bestehen in einer Beschreibung der individuell zu definierenden Aspekte. Um trotzdem einen Eindruck für mögliche Ausprägungen zu vermitteln, werden Beispiele aus veröffentlichten Arbeiten genannt. Die entsprechenden Textteile sind *kursiv* markiert.

6.4.1 Modulare Fahrplattform in realgetreuer Größe

Im Folgenden werden Anforderungen an eine modulare Fahrplattform in realgetreuer Skalierung für den Einsatz auf abgeschlossenen Testgeländen beschrieben.

Geometrie

Das Grundgerüst einer Fahrplattform besteht aus einer Kabine, in der der Arbeitsplatz der Sicherheitsperson integriert ist. Dieser Platz besteht mindestens aus einem Sitz und Anzeige- und Bedienelementen. Außerdem findet in der Kabine die benötigte Technik (Rechnerinfrastruktur etc.) Platz.

Die Außenkontur der Fahrplattform ist variabel zu gestalten, um durch Modularität verschiedene zu untersuchende teleoperierte Fahrzeuge abzudecken. So könnte bspw. Die Geometrie zwischen Pkw und Lkw(-Zugmaschine) variiert werden. Diese Variation kann entweder durch austauschbare Außenelemente (Verkleidung an der Plattform stattfinden, oder durch Simulation und virtuelle Darstellung für das Teleoperationspersonal realisiert werden. Im Fall der digitalen Variation ist diese auch bei der Datenaufzeichnung bzw. –auswertung zu beachten.

Das Fahrwerk der modularen Fahrplattform sollte ebenfalls an das zu untersuchende Fahrzeugkonzept anpassbar sein. D.h. es sollten (mindestens softwareseitig) z.B. verschiedene Wendekreise einstellbar sein.

Kommunikation mit dem Leitstand

Um die Kommunikation zwischen Fahrplattform und Leitstand im Versuchsbetrieb sicherzustellen, ist eine ausreichende Netzabdeckung zu gewährleisten. Das kann entweder über ein am Versuchsstandort vorhandenes Mobilfunknetz erfolgen, wobei Redundanz durch Verfügbarkeit verschiedener Netzanbieter von Vorteil ist, oder es ist für die Teststrecke ein eigenes Drahtlosnetzwerk zur Verfügung zu stellen.

Hinsichtlich der Datenverbindung berichten Kalaiyaran et al. (2021) allgemein von hohen Anforderungen an Verfügbarkeit und Stabilität. Schippers et al. (2023) beschreiben eine

Anforderung an die Latenz von < 300 ms und Schimpe et al. (2022a) berichten von einer erreichten Latenz bei der Übertragung vom Fahrzeug zum Teleoperatorarbeitsplatz von 104 ms.

Beschriebene Uplink-Datenraten liegen bei 20 bis 32 Mbit/s (Kalaiyarasan et al., 2021; Schippers et al., 2023). Die Downlink-Rate wird als kaum relevant beschrieben.

In beiden Fällen muss sichergestellt sein, dass kein unbefugter Zugriff auf die Daten erfolgen oder eine Manipulation stattfinden kann. Richtlinien hierzu bieten die *Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung – AFGBV)* sowie einschlägige Normen/Standards, z.B. ISO/SAE 21434 und UNECE R 155.

Technische Ausstattung

Die technische Ausstattung der modularen Fahrplattform umfasst eine an den Untersuchungszweck angepasste Umfelderkennung, Datenaufzeichnung und Assistenzfunktionen.

Zur Umfelderkennung gehören mindestens individuell positionierbare Kameras, um der teleoperierenden Person Bilder der Fahrsituation zur Verfügung zu stellen. Je nach Versuchsziel werden diese um weitere Umfelderkennung (z.B. Radar-, LIDAR- und/oder Ultraschallsensoren) erweitert. Ggf. werden auch Mikrofone zur Erfassung von Umgebungsgereuschen vorgesehen.

Aus der einschlägigen Literatur gehen folgende Hinweise hervor:

- *Kameras sollten mindestens Sichtfeld einer fahrenden Person im Fahrzeug abdecken und ausreichende Qualität bieten, um die Fahraufgabe auszuführen (BSI, 2023). Weiterhin sind Vorkehrungen für die Funktion bei schlechtem Wetter notwendig (z.B. Abdeckungen, Reinigungssysteme; BSI, 2023)*
- *Forschungsaufbauten beinhalten eine (Saez-Perez et al., 2023), vier (1 Front, 2 seitlich, 1 rückwärtig; Kalaiyarasan et al., 2021; Ouden et al., 2022) oder acht Kameras (3 Front, 1 rückwärtig, 4 Fischaugenkameras für Nahbereich; Schimpe et al., 2022a)*
- *Verwendete Kameras laufen mit 30-40 Hz und Auflösungen von 1280x800 bzw. 1920x1200 Pixeln und verursachen ein Datenvolumen zwischen jeweils 3-6 Mbit/s (Schimpe et al., 2021) bzw. 8 Mbit/s (Kalaiyarasan et al., 2021; Schippers et al., 2023)*
- *Forschungsaufbauten beinhalten Videokompression mit H.264-Codec (Ouden et al., 2022)*

Je nach Versuchszweck ist eine geeignete Aufzeichnung von Sensordaten und Fahrzeuginformationen vorzusehen. Diese können entweder direkt im Fahrzeug aufgenommen und gespeichert werden, oder aber per Streaming an den Leitstand oder Versuchsleitungsplatz gesendet und dort gespeichert werden. Im Fahrzeug muss dafür für Verarbeitung, Integration und Weiterleitung von Sensordaten Hardware mit ausreichender Rechenleistung zur Verfügung stehen. *Spezifikationen von aus der Literatur bekannten Aufbauten sind hierbei z.B. Intel Xeon Gold 6130 2.10 GHz CPU mit 32 GB RAM (Schimpe et al., 2022a) oder Intel Core i7-10750H CPU 2.60 GHz mit NVIDIA GeForce RTX 2060 (Saez-Perez et al., 2023). Die CAN-Bus-Anbindung erfolgt im Fall von Schimpe et al. (2022a) mittels einer dSPACE Auto-box.*

Die auf der Fahrplattform zu realisierenden Assistenzsysteme richten sich nach dem Untersuchungsziel. Zu ggf. benötigten Assistenzfunktionen gehören das Minimal Risk Manöver (MRM), Unterstützung der Längsführung (z.B. ACC, Notbremsassistent), Unterstützung der Quersicherung (z.B. Spurverlassenswarner, Spurhalteassistent) und Unterstützung bei der Absicherung (z.B. Spurwechselwarner).

Sicherheitssysteme

Als Sicherheitssystem ist mindestens ein Not-Aus vorzusehen, sofern kein MRM zur Verfügung steht. Der Not-Aus muss von Sicherheitsperson, Versuchsleitung und teleoperierender Person gleichermaßen auslösbar sein und alle anderen Funktionen übersteuern.

Darüber hinaus sollte die Sicherheitsperson im Fahrzeug jederzeit mit den anderen Versuchsbeteiligten (Versuchsleitung, teleoperierende Person) kommunizieren können. Die Realisierung kann z.B. über Funk oder Mobilfunk erfolgen.

Sicherheitsperson

Der Test- und Erprobungsbetriebs eines teleoperierten Fahrzeugs wird von einer Sicherheitsperson begleitet, die sich in der Regel im teleoperierten Fahrzeug befindet, die aktuelle Verkehrsumgebung wahrnimmt und den Teleoperationsbetrieb überwacht sowie bei einem Verstoß gegen die Regeln des Testbetriebs oder identifizierten Risiken eingreift, um die Sicherheit zu gewährleisten. Dafür kann jederzeit die vollständige Kontrolle über die dynamische Fahraufgabe (d.h. Quer und Längsführung) übernommen werden, wenn dies erforderlich sein sollte (BSI, 2021; Kalaiyarasan et al., 2021). Bei sehr geringer Fahrgeschwindigkeit, kann sich die Sicherheitsperson evtl. auch außerhalb des Fahrzeugs befinden und von dort eingreifen (d.h. ein MRM auslösen).

Die Aufgaben einer Sicherheitsperson beinhalten folgende Aspekte (Kalaiyarasan et al., 2021):

- Aufmerksame Beobachtung des gesamten Testbetriebs und der Umgebung (unabhängig von der Betriebsart)
- Kenntnis des Teleoperationssystems (d.h. Fähigkeiten und Grenzen), Erkennen von Abweichungen vom erwarteten Fahrverhalten
- Gewährleistung des sicheren Betriebs durch Überwachung des Fahrzeugs und des Teleoperationsbetriebs und – falls erforderlich – Eingreifen
- Befolgen der Richtlinien und Sicherheitsverfahren
- Überwachung der Systemsoftware, der Kameras und der Fehlermeldungen, Bedienung der fahrzeugeigenen Datenaufzeichnung und Protokollierung
- Erteilung von verbalen Rückmeldungen/Anweisungen zur Fahrzeugumgebung
- Beteiligung an der Fahrzeugvorbereitung (z.B. Fahrzeuginspektion, Prüfen und Testen von Geräten)
- Abgabe von subjektivem Feedback zum Test (evtl. auch Dokumentation der Testergebnisse)
- Mitwirkung bei der Diagnose und Fehlerbehebung
- Umgang mit und Bewältigung von Zwischenfällen

Um diese Aufgaben ausführen zu können, ist beim Aufbau der mobilen Fahrplattform die entsprechende Informationsdarstellung für die Sicherheitsperson einzuplanen. So muss der Status der Kommunikationsverbindung zwischen Kontrollzentrum und Fahrzeug (inkl. Latenz, Bandbreite, etc.) ebenso erkannt werden können wie Status und Funktion aller für die Überwachung relevanten Fahrzeug- und Teleoperationssysteme (z.B. Kameras, weitere Sensorik). Daneben muss die Sicherheitsperson über die nötigen Eingabemöglichkeiten verfügen. Dies beinhaltet in der Regel einen Not-Aus Schalter, der andere Eingaben übersteuert, und Eingabemöglichkeiten für Längs- und Querführung (i.d.R. Lenkung und Fahrpedale). Im Falle relativ langsamer Fahrmanöver auf einer Teststrecke könnte eine Sicherheitsperson auch von außerhalb des Fahrzeugs über eine Fernsteuerung eine Not-Aus-Eingabe triggern. Dabei ist ggf. die Sicherheit der Funkverbindung zwischen Fernsteuerung und teleoperiertem Fahrzeug sicherzustellen, z.B. über eine Totmanneinrichtung. Weiterhin muss die Sicherheitsperson in der Lage sein, mit dem Kontrollzentrum und der Versuchsleitung zu kommunizieren sowie die Datenaufzeichnung und Protokollierung zu bedienen.

Tab. 21 fasst die beschriebenen Anforderungen an die modulare Fahrplattform in realge-
treuer Größe zusammen.

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Geometrie	Kabine für Sicherheitsperson	Grundgerüst mit Kabine mit Sitz und Bedienelementen für Sicherheitsperson, Technik etc.
	Außenkontur	anpassbar auf Untersuchungsgegenstand, z.B. durch Anbringen von verschieden gestalteten Außenelementen (ggf. auch simulierbar)
	Fahrwerk	anpassbar auf Untersuchungsgegenstand, z.B. Einschränkung des Wendekreises etc.
Kommunikation mit Leitstand	Stabilität der Datenverbindung/Bandbreite/Datenqualität	<p>Ausreichende Netzabdeckung ist sicherzustellen, entweder über am Versuchsstandort vorhandenes Mobilfunknetz (ggf. Redundanz durch mehrere Netzbetreiber), oder durch zum Versuchszweck eigens aufgespanntes Drahtlosnetzwerk (<i>jeweils unter Beachtung des Punkts „Security“</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Hohe Anforderungen an Verfügbarkeit und Stabilität (Kalaiyaran et al., 2021) sowie Latenz (<300 ms; Schippers et al., 2023). Schimpe et al. (2022a) berichtet von einer Latenz Fahrzeug → Teleoperatorarbeitsplatz von 104 ms.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen an die Uplink-Bandbreite liegen zwischen 20-32 Mbit/s (Kalaiyarasan et al., 2021; Schippers et al., 2023). Downlink-Rate kaum relevant
	Security	<p>Cybersicherheit/Schutz gegen unerlaubten Zugriff in Anlehnung an AFGBV, Anlage 1, Teil 5 (BMJ, 2022)</p> <p>Beachtung einschlägiger Normen/Standards, z.B. ISO/SAE 21434 und UNECE R 155</p>
Technische Ausstattung	Umfelderfassung	<p>Individuell Positionierbare Kameras bzw. Sensoren (z.B. Radar, LIDAR)</p> <p><i>Hinweise:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kameras sollten mindestens Sichtfeld einer fahrenden Person im Fahrzeug abdecken und ausreichende Qualität bieten, um die Fahraufgabe auszuführen (BSI, 2023). Weiterhin sind Vorkehrungen für die Funktion bei schlechtem Wetter notwendig (z.B. Abdeckungen, Reinigungssysteme; BSI, 2023) • Forschungsaufbauten beinhalten eine (Saez-Perez et al., 2023), vier (1 Front, 2 seitlich, 1 rückwärtig; Kalaiyarasan et al., 2021; Ouden et al., 2022) oder acht Kameras (3 Front, 1 rückwärtig, 4 Fischaugenkameras für Nahbereich; Schimpe et al., 2022a) • Verwendete Kameras laufen mit 30-40 Hz und Auflösungen von 1280x800 bzw. 1920x1200 Pixeln und verursachen ein Datenvolumen zwischen jeweils 3-6 Mbit/s (Schimpe et al., 2021) bzw. 8 Mbit/s (Kalaiyarasan et al., 2021; Schippers et al., 2023) • Forschungsaufbauten beinhalten Videokompression mit H.264-Codec (Ouden et al., 2022)

		Mikrofone für Fahrzeugumgebung (Innenraum über Kommunikationsverbindung zur Sicherheitsperson abgedeckt)
	Datenaufzeichnung	Je nach Versuchszweck: Ermöglichen einer Aufzeichnung von Sensordaten und Fahrzeuginformationen Speicherung und/oder Streaming
	Rechenleistung	Ausreichend zur Verarbeitung, Integration und Weiterleitung der Sensordaten <i>Hinweise:</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Beispiele für die verwendete Hardware: Intel Xeon Gold 6130 2.10 GHz CPU mit 32 GB RAM (Schimpe et al., 2022a), Intel Core i7-10750H CPU 2.60 GHz mit NVIDIA GeForce RTX 2060 (Saez-Perez et al., 2023)</i> • <i>Anbindung an CAN-Bus: dSPACE AutoBox (Schimpe et al., 2022a)</i>
	Assistenzsysteme	Vgl. Anforderungen an den Leitstand (<i>variabel je nach Versuchszweck</i>)
Sicherheitssysteme	MRM bzw. Not-Aus	Auslösbar von teleoperierender Person, Versuchsleitung und Sicherheitsperson
	Kommunikationssystem mit Dritten	Kommunikation der Versuchsbeteiligten (teleoperierende Person, Versuchsleitung, Sicherheitsperson) jederzeit möglich, z.B. per Funk oder Mobilfunk
Ausstattung für Sicherheitsperson	HMI/Informationsanzeige	Anzeige aktueller Latenz und Datenqualität Ggf. Anzeige aktuell aktiver Assistenzsysteme
	Primäre Bedienelemente	Not-Aus, der immer alle anderen Eingaben übersteuert (ggf. mit Abstufung für „klassische“ Fernsteuerung vor Ort auf Testgelände) Eingabelemente für Längs- und Querrführung, z.B. Lenkung und Fahrpedale, die Teleoperation übersteuern
	Sekundäre Bedienelemente	Kommunikation mit teleoperierender Person und Versuchsleitung Eingabe von „manuellem Logging“

Tab. 21: Anforderungen an die modulare Fahrplattform in realgetreuer Größe.

Empfehlungen

Über die beschriebenen Anforderungen hinaus können hinsichtlich der Gestaltung der Fahrplattform einige Empfehlungen formuliert werden:

- **Antrieb:** Bevorzugt sollte ein Elektroantrieb zum Einsatz kommen. Dieser ermöglicht mit geringem Aufwand eine softwareseitige Anpassung von Leistung, Kennlinien und Ansprechverhalten.
Zudem könnte eine Umsetzung von Einzelradantrieben an allen Rädern das Darstellen verschiedener Antriebskonzepte (z.B. Frontantrieb, Heckantrieb, Torque Vectoring etc.) ermöglichen.
- **Lenkung:** Im Fall eines teleoperierten Fahrzeugs ist von einem Steer-by-wire System auszugehen. Dies ermöglicht zum einen eine unkomplizierte Ansteuerung der Lenkung und bei Bedarf z.B. eine schnelle Anpassung der Lenkübersetzung und zum anderen kann leicht eine Übersteuerung der Teleoperation durch die Versuchsleitung oder die Sicherheitsperson umgesetzt werden.
Neben der Umsetzung von Steer-by-wire könnte auch die Möglichkeit, jedes Rad individuell zu lenken, Vorteile bieten. So könnten neben einer klassischen Vorderachslenkung zukünftig auch weitere innovative Lenkkonzepte mit Allradlenkung im Versuchsbetrieb berücksichtigt werden.
- **Sonstiges:** Neben Steer-by-wire ist aus den gleichen Gründen (Ansteuerung, Skalierung der Leistung, Anpassung des Ansprechverhaltens, Übersteuerbarkeit) auch für die Bremsanlage Brake-by-wire vorzusehen.

Ein Beispiel für ein modulares Fahrzeugkonzept und dessen prototypische Umsetzung bietet das BMBF-geförderte Projekt UNICARagil. Hier wurden viele der genannten Anforderungen und Empfehlungen bereits umgesetzt. An einer Plattform werden sogenannte „Dynamikmodule“ (Einzelradantrieb und –lenkung) angebunden. Auf die Plattform können verschiedene Aufbaumodule mit verschiedenen Maßen gesetzt werden (z.B. zum Personentransport – „autoTAXI“, oder zum Lastentransport – „autoCARGO“). Am Aufbau werden die jeweils benötigten Sensormodule angebracht. (UNICARagil Konsortium, 2023).

6.4.2 Modulare Fahrplattform in skaliertem Maßstab

Der Einsatz von teleoperierten Modellfahrzeugen bietet einige Vorteile, wie z.B. ein geringes Gefährdungspotential, ein unter Umständen reduzierter Aufwand in der Versuchsdurchführung und geringere Kosten. Aufgrund des geringeren Platzbedarfs ist gegebenenfalls eine Versuchsdurchführung in Hallen/Innenräumen möglich. Während die meisten kritischen Sicherheitsprobleme im Zusammenhang mit Experimenten mit realen Fahrzeugen bei Nutzung von Modellfahrzeugen verschwinden, bleibt ein echtes grundsätzliches Risiko (z.B. einer Beschädigung des Modellfahrzeugs) im Zusammenhang mit den Steuer- und Bedienhandlungen des Teleoperationspersonals bestehen. Dies kann die Realitätsnähe dieses Forschungsansatzes im Vergleich zur reinen Simulation des teleoperierten Fahrzeugs erhöhen.

Eine Implementierung und empirische Überprüfung von teleoperierten Systemen ist bei der Verwendung skaliertem Fahrzeuge im Vergleich zu realen Fahrzeugen je nach Fragestellung mit weniger Aufwand umsetzbar und der Erkenntnisgewinn kann auf diese Weise beschleunigt werden. Weiterhin ergänzen sich die verschiedenen Ansätze (d.h. die Teleoperation eines virtuellen Fahrzeugs in der Fahrsimulation, eines echten Modellfahrzeugs so-

wie eines realgroßen Fahrzeugs) in ihren Möglichkeiten, Forschungsfragen zu beantworten. Welcher Ansatz für eine spezifische Fragestellung am besten geeignet ist, ist im Einzelfall zu bewerten.

Eine Reihe von Autoren hat bislang Modellfahrzeuge zur Demonstration der teleoperierten Fahrzeugführung benutzt. Schimpe et al. (2022a) benutzen ein Modellfahrzeug in der Skalierung 1:10. Dieses ist mit einer Stereokamera ausgerüstet, die die Frontsicht zum Teleoperatorarbeitsplatz überträgt. Das (vermutlich) gleiche Fahrzeug wird auch von Schimpe et al. (2022b) verwendet.

Beide Artikel verweisen auf O’Kelly et al. (2019), die eine auf einem Modellfahrzeug basierende Plattform zur Untersuchung autonomer Systeme und cyber-physikalischer Systeme im Automobilbereich vorstellen. Die F1/10 genannte Plattform ist open-source, basiert auf ROS (open-source Robot Operating System) und wurde entwickelt, um dem Wunsch nach einer realistischen Fahrzeugdynamik und einem realistischen Antriebsstrang zu begegnen. Die Anforderungen an die F1/10 Plattform waren somit (1) die Darstellung der Dynamik eines autonomen Fahrzeugs, (2) die Modularität von Hardware- und Softwarestruktur, um Upgrades, Wartung und Reparaturen zu ermöglichen, und (3) die Autarkie der Plattform in Bezug auf Energieversorgung, Rechenleistung und Sensorik. O’Kelly et al. (2019) beschreiben wichtige Kriterien für die Gestaltung von (a) Chassis, (b) Sensorik, Rechenleistung und Software, (c) Energieversorgung, (d) Odometrie zur Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung und € Kommunikationsarchitektur.

Auch Pohjala (2016) baut im Rahmen einer Masterarbeit mit Hilfe von allgemein verfügbaren Komponenten ein teleoperiert zu steuerndes Modellfahrzeug auf. Die maximale Fahrgeschwindigkeit des Modellfahrzeugs beträgt ca. 1 m/s. Da das Fahrzeug etwa 28 cm lang ist, kann es seine eigene Länge 3,5 Mal pro Sekunde zurücklegen. Umgerechnet auf ein normales Fahrzeug (mit einer Länge von 4,3 m) wären das bei gleicher relativer Geschwindigkeit ca. 15 m/s bzw. 54 km/h. Pohjala (2016) betont allerdings, dass die gewählte Fahrzeuggröße mit einer Skalierung von ca. 1:16 für ernsthafte Forschungsanwendungen eher zu klein ist, da das Anbringen von Hardwarekomponenten (z.B. Sensorik) unnötig erschwert wird.

Le et al. (2023) vergleichen die Wahrnehmung und das Verhalten von Fahrenden, die zwei verschiedene Teleoperationssysteme verwenden. Die erste besteht aus einer Fahrstation und einem 1:10 Modellfahrzeug. Die visuellen Informationen werden über eine Kamera erfasst und den Probanden dargestellt. Die zweite nutzt die gleiche Fahrstation, jedoch wird ein virtuelles Fahrzeug in einer Fahrsimulation gesteuert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmenden die Testumgebung mit dem Modellfahrzeug als realistischer als die Steuerung eines virtuellen Fahrzeugs in der Fahrsimulation erleben und das grundsätzliche Risiko eines Unfalls mit dem Modellfahrzeug dafür mitverantwortlich ist.

Die relevanten Bestandteile eines Modellfahrzeugs als modulare Fahrplattform sind in allen beschriebenen Fällen ähnlich und umfassen

- das Chassis (inkl. Fahrwerk und Lenkung),
- den/die Motor(en),
- die Energieversorgung (Batterie),
- die Kamera(s) bzw. andere Sensorik,
- das Kommunikationsmodul (Sender, Empfänger) und

- den Controller zur Steuerung der Aktoren.

Wichtig können weiterhin und in Abhängigkeit vom Anwendungsfall Beleuchtung, Bremsen (nicht nur Motorbremse) und die Karosserie sein.

Folgende Anforderungen sind an ein Modellfahrzeug als modulare Fahrplattform zur Untersuchung der teleoperierten Fahrzeugführung zu stellen:

Gesamtaufbau

Die meisten in der Literatur beschriebenen zu Forschungszwecken genutzten Modellfahrzeuge sind im Maßstab 1:8 oder 1:10 skaliert. Auch als Basis für den Aufbau eines teleoperierten Modellfahrzeugs haben sich diese Fahrzeuge in bisherigen Anwendungen als gut geeignet erwiesen.

Der Gesamtaufbau sollte ausreichend robust und stabil sein und sensiblen Teilsystemen je nach Einsatzumgebung ausreichenden Schutz vor der Witterung und insbesondere Feuchtigkeit bieten. Eine entsprechende Modularität und Erweiterbarkeit sorgt dafür, dass verschiedene Hardware-Aufbauten und Konfigurationen realisiert werden können, z.B. verschiedene Kamerakonfigurationen und Sensorsysteme.

Chassis und Fahrwerk sollten eine möglichst realistische Darstellung der Fahrdynamik ermöglichen. Die Auslegung sollte hier unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitstheorie erfolgen²⁵. Bspw. ist darauf zu achten, dass die Fahrplattform die für die Untersuchungsfragen nötigen Geschwindigkeiten insofern erreicht, als dass sie der Ähnlichkeitstheorie folgend den entsprechenden Geschwindigkeiten des abgebildeten realgroßen Fahrzeugs entsprechen. Falls notwendig, ist auch vorzusehen, dass rückwärts gefahren werden kann.

Für Anbauteile wie Kameras oder weitere Sensoren ist das Verhältnis der Masse zur Gesamtsystemmasse zu berücksichtigen. Es ist zu erwarten, dass die Masse dieser Komponenten im Gegensatz zum Einsatz im realgroßen Aufbau nicht vernachlässigbar ist. So sind entsprechende Teile ggf. in die Gesamtsystemmasse einzubeziehen und der Einfluss auf die Masseverteilung zu beachten, um unerwünschte Auswirkungen auf die Fahrdynamik zu vermeiden. Die Lagerung der Sensoren ist so auszulegen, dass die Beeinflussung der Datenqualität durch Schwingungen und Vibrationen minimiert wird.

Kommunikation mit dem Leitstand

Um die Kommunikation zwischen Fahrplattform und Leitstand im Versuchsbetrieb sicherzustellen (d.h. Senden von Befehlen ans Fahrzeug und Erhalten von (Sensor-)Informationen vom Fahrzeug), ist eine ausreichende Netzabdeckung zu gewährleisten. Das kann entweder über ein am Versuchsstandort vorhandenes Mobilfunknetz erfolgen oder es ist für die Teststrecke ein eigenes Drahtlosnetzwerk zur Verfügung zu stellen. *Schimpe et al. (2022a) berichten von einer Latenz vom Fahrzeug zum Teleoperatorarbeitsplatz von 241 ms.*

²⁵ Das Grundprinzip der Ähnlichkeitstheorie basiert auf der Entdimensionierung physikalischer Sachverhalte. Gemäß dieser Theorie können physikalische Gesetzmäßigkeiten unabhängig von Maßsystemen in einem dimensionslosen Raum in Form von Kennzahlen formuliert werden. Das erlaubt wiederum das Darstellen physikalischer Ähnlichkeiten, indem skalierte Systeme unter Berücksichtigung dieser Kennzahlen ausgelegt werden (vgl. Hilgert, 2005; Worthoff & Siemes, 2012).

Solange Security-Aspekte nicht im Fokus des Versuchs stehen, kann auf diesbezügliche spezifische Maßnahmen bei der Kommunikation zwischen Leitstand und Fahrplattform verzichtet werden.

Technische Ausstattung

Die technische Ausstattung des teleoperierten Modellfahrzeugs umfasst ähnlich wie bei realskalierten Fahrzeugen eine an den Untersuchungszweck angepasste Umfelderkennung und Datenaufzeichnung.

Zur Umfelderkennung gehören mindestens individuell positionierbare Kameras, um der teleoperierenden Person Bilder der Fahrsituation zur Verfügung zu stellen. *Bekannte Forschungsaufbauten verwenden häufig eine einzelne Frontkamera (Schimpe et al., 2022a; Yu & Lee, 2022). Eine Beispielspezifikation beschreiben Yu und Lee (2022) mit 170° Blickwinkel, 1280x720 Pixel und 30 fps.* Je nach Versuchsziel werden diese um weitere Systeme zur Umfelderkennung (z.B. Radar-, LIDAR- und/oder Ultraschallsensoren) erweitert. Ggf. sind auch Mikrofone zur Erfassung von Umgebungsgeräuschen vorzusehen. Schließlich sind Sensoren vorzusehen, die eine exakte Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung ermöglichen. Falls bei Dunkelheit gefahren werden soll, ist eine entsprechende Beleuchtungsanlage vorzusehen.

Je nach Versuchsziel ist eine geeignete Aufzeichnung von Sensordaten und Fahrzeuginformationen vorzusehen. Diese können entweder direkt im Fahrzeug aufgenommen und gespeichert werden oder per Streaming an den Leitstand oder Versuchsleiterplatz gesendet und dort gespeichert werden.

Es ist eine ausreichende Rechenleistung zur Verarbeitung, Integration und Weiterleitung der Sensordaten vorzusehen (*Beispiel für verwendete Hardware: NVIDIA TX2 8 GB RAM (Yu & Lee, 2022).* Auch ist darauf zu achten, dass die Energieversorgung für eine ausreichend lange Fahrt sichergestellt ist. Dies betrifft sowohl die Antriebsmotoren des Modellfahrzeugs als auch die Energieversorgung der Rechnerhardware.

Sicherheitsperson und -systeme

Im Gegensatz zu einem realgroßen Fahrzeug kann beim (klein-)skalierten teleoperierten Fahrzeug keine Sicherheitsperson zum Einsatz kommen, die sich im Fahrzeug befindet. Nichtsdestotrotz ist eine Sicherheitsperson vorzusehen, die das teleoperierte Fahrzeug überwacht. Eine Sicherheitsperson sollte jederzeit direkte Sicht auf das teleoperierte gesteuerte Modellfahrzeug haben. Die Eingabemöglichkeiten können eine Bedieneinheit/Steuerkonsole oder auch ein Smartphone/Tablet sein. Wichtig ist insbesondere, dass die Eingaben der teleoperierenden Person übersteuert werden können und das Modellfahrzeug schnell und einfach zum Halten gebracht werden kann (z.B. über einen Not-Aus Knopf), um bei möglichen Incidents evtl. Schäden am Fahrzeug oder der Umgebung zu verhindern.

Als Sicherheitssystem ist ein Not-Aus vorzusehen. Der Not-Aus muss von Sicherheitsperson, Versuchsleitung und Teleoperationspersonal gleichermaßen auslösbar sein und alle anderen Funktionen übersteuern. Je nach Gefährdungspotenzial kann alternativ auch eine Totmanschaltung eingerichtet werden. Dabei muss die Sicherheitsperson dauerhaft einen Freigabeschalter betätigen – das Nothaltemanöver wird beim Loslassen des Schalters automatisch eingeleitet.

Darüber hinaus sollte die den Versuch beobachtende Sicherheitsperson jederzeit mit den anderen Versuchsbeteiligten (Versuchsleitung, teleoperierende Person) kommunizieren können. Die Realisierung kann z.B. über Funk oder Mobilfunk erfolgen.

Tab. 22 fasst die Anforderungen an eine modulare skalierte Fahrplattform zusammen.

Aspekt	Teilaspekt	Ausprägung
Gesamtaufbau	Skalierung	Zum Versuchszweck und zur Einsatzumgebung passend <i>Hinweis: Aus der Literatur sind insbesondere Beispiele mit den Maßstäben 1:8 bzw. 1:10 bekannt und haben sich bewährt.</i>
	Karosserie	Robust und stabil mit an die Einsatzumgebung angepasstem Witterungsschutz Modularität und Erweiterbarkeit für verschiedene Hardware-Aufbauten und Konfigurationen
	Chassis und Fahrwerk	Realistische Darstellung der Fahrdynamik Ausreichendes Geschwindigkeitsspektrum (ggf. inkl. Rückwärtsfahren) Geeignete Lagerung von Kameras und weiteren Sensoren
Kommunikation mit Leitstand	Stabilität der Datenverbindung/Bandbreite/Datenqualität	Ausreichende Netzabdeckung (entweder über am Versuchsstandort vorhandenes Mobilfunknetz, oder durch zum Versuchszweck eigens aufgespanntes Drahtlosnetzwerk) <i>Hinweis:</i> <i>Schimpe et al. (2022a) berichten von einer erreichten Latenz vom Fahrzeug zum Teleoperatorarbeitsplatz von 241 ms.</i>
Technische Ausstattung	Umfelderfassung	Individuell positionierbare Kameras bzw. Sensoren (z.B. Radar, LIDAR) <i>Hinweis:</i> <i>Forschungsaufbauten beinhalten häufig eine einzelne Frontkamera (Schimpe et al.; 2022a; Yu & Lee, 2022). Spezifikation bei Yu und Lee (2022) mit 170° Blickwinkel, 1280 × 720 Pixel und 30 fps.</i>

		Ggf. Mikrofone für Fahrzeugumgebung
		Exakte Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung
	Datenaufzeichnung	Je nach Versuchszweck: Ermöglichen einer Aufzeichnung von Sensordaten und Fahrzeuginformationen Speicherung und/oder Streaming
	Rechenleistung	Ausreichend zur Verarbeitung, Integration und Weiterleitung der Sensordaten <i>Beispiel für verwendete Hardware: NVIDIA TX2 8 GB RAM (Yu & Lee, 2022)</i>
	Energieversorgung	Für eine ausreichend lange Fahrt Für Antriebsmotor(en) und Rechnerhardware
Sicherheitsperson und -systeme	Sicherheitsperson	Jederzeit direkte Sicht auf das teleoperiert gesteuerte Modellfahrzeug
	Not-Aus	Auslösbar von Teleoperationspersonal, Versuchsleitung und Sicherheitsperson Ggf. alternativ Totmannschaltung für Sicherheitsperson
	Kommunikationssystem mit Dritten	Kommunikation der Versuchsbeteiligten (Teleoperationspersonal, Versuchsleitung, Sicherheitsperson) jederzeit möglich, z.B. per Funk oder Mobilfunk

Tab. 22: Anforderungen an eine modulare skalierte Fahrplattform.

7 Prototypische Umsetzung eines Teleoperations-Leitstands

Die definierten Anforderungen an einen experimentellen Leitstand dienen als Grundlage für die Ausarbeitung eines konkreten technischen Konzepts und die entsprechende Umsetzung eines experimentellen Leitstands. Eine kosten- und leistungsoptimierte, aber dennoch realitätsgetreue technische Umsetzung der Teleoperationsform Telefahren bildet dabei den Schwerpunkt des Konzepts, sodass das umgesetzte Konzept grundsätzlich die Untersuchung eines breiten Spektrums experimentalpsychologischer Fragestellungen gewährleisten kann. Der implementierte prototypische experimentelle Leitstand erlaubt die Steuerung eines virtuellen Fahrzeugs und ist mit der WIVW eigenen Fahrsimulationssoftware SILAB gekoppelt.

Auf diese Weise werden die erarbeiteten Anforderungen an einen experimentellen Leitstand in ein prototypisches Konzept umgesetzt, das eine Visualisierung, Erprobung und Demonstration unterschiedlicher Lösungsvarianten ermöglicht. Der aufgebaute Teleoperatorarbeitsplatz fokussiert dabei auf das Telefahren des Fahrzeugs durch eine teleoperierende Person und weniger auf die Teleassistenz (z.B. durch die Auswahl geeigneter Trajektorien).

Die aufzubauende simulatorgestützte Entwicklungs- und Forschungsumgebung besteht aus einem teleoperiert gesteuerten simulierten Fahrzeug, dem Operatorarbeitsplatz inkl. Displays, GUI und Steuerungsmöglichkeiten für die Bedienenden und der Datenübermittlung zwischen Simulation (bzw. simuliertem Fahrzeug) und Operatorarbeitsplatz.

Der Prototypenaufbau hat zum Ziel, die Konzeptarbeiten durch iterative Erprobung unterschiedlicher Gestaltungslösungen zu begleiten und zu unterstützen. Die virtuelle Forschungsumgebung erlaubt die kontrollierte Variation der für das Situationsbewusstsein und die Fahrperformanz des Operators relevanten Einflussgrößen (z.B. Kamerasichten, Zusatzinformationen, Latenzen).

7.1 Leitstand

Der aufgebaute experimentelle Leitstand dient dem Telefahren und hat folgende Hauptfunktionen:

- Steuerung der lateralen und longitudinale Dynamik des Fahrzeugs (Lenkung, Beschleunigung, Verzögerung)
- Ausführen von Sekundärfunktionen wie Hupe oder Licht
- Präsentation von Sensorinformationen (Kamerabild, Fahrdaten, Zustandsdaten)
- Ein- und Ausleiten der Teleoperation

Die Basiskomponenten des Teleoperatorarbeitsplatzes sind dabei:

- Sitzplatz (Ergonomie in Anlehnung an einen Fahrzeugsitz)
- Lenkrad
- Pedalerie
- Bildschirme zur Sichtdarstellung

Entsprechend der Anforderung, den Arbeitsplatz einer teleoperierenden Person im Fall von Telefahren ähnlich zum Fahrerplatz in einem Fahrzeug zu gestalten, werden die genannten Hauptkomponenten im Konzeptentwurf in Anlehnung an eine Fahrzeuggeometrie angeordnet (Bild 3 links). Das HMI-Konzept sieht die Verwendung von vier Bildschirmen zur Darstellung der Sichten vor (Bild 3 rechts). Der Fokus des Gesamtaufbaus liegt auf der Variabilität der Anordnung der Basiskomponenten sowie der Möglichkeit, im Versuchsbetrieb ggf. benötigte Zusatzkomponenten mit geringem Aufwand zu ergänzen. Die Gestaltung der Grundstruktur basiert daher auf Aluminium-Schienenprofilen. Diese bieten die angestrebte Variabilität und erlauben eine kompakte Bauweise. Die Plattform besteht aus drei voneinander trennbaren Einheiten. Auf der Haupteinheit wird der Sitz montiert, die weiteren Einheiten dienen der Anbindung von Pedalerie und Lenkrad.

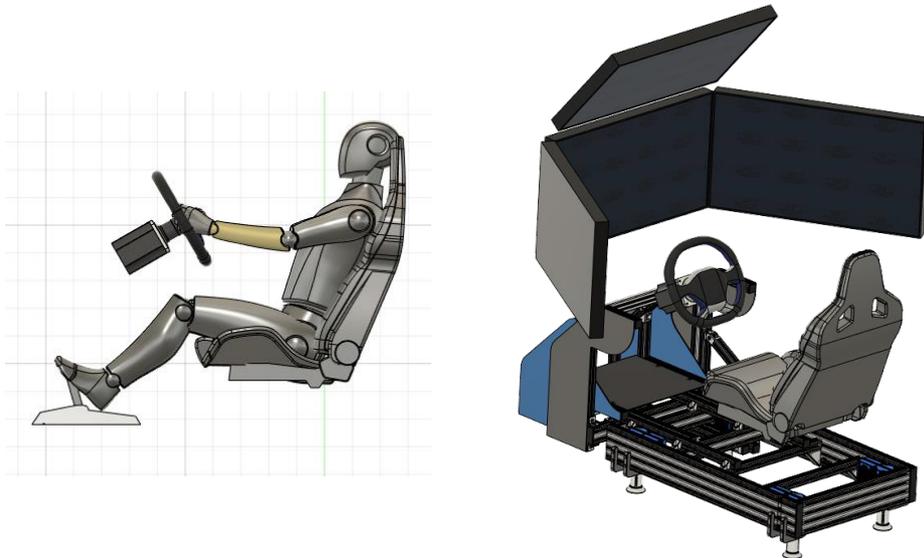


Bild 3: Fahrzeugähnliche Anordnung von Sitz, Lenkrad und Pedalerie (links) und Gesamtaufbau (rechts) des prototypischen experimentellen Leitstands.

Die Pedalerie- und Lenkradeinheit können in den Basisrahmen eingeschoben und mit wenigen Arbeitsschritten montiert werden. So ist sichergestellt, dass der Aufbau mit geringem Aufwand (z.B. zwischen Versuchslabors) transportiert werden kann und dabei nicht vollständig abgebaut werden muss. Bild 4 zeigt eine Darstellung mit hervorgehobener Lenk- (Mitte) und Pedaleinheit (rechts). Bei Lenkrad und Pedalerie handelt es sich um Komponenten, die eine aktive (Lenkrad) bzw. passive (Pedalerie) Krafterückmeldung bieten.

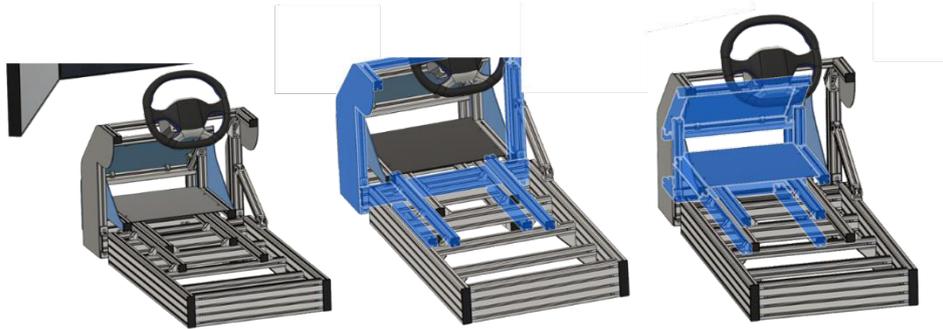


Bild 4: Basisplattform mit hervorgehobener Lenkradeinheit (Mitte) und Pedalerieeinheit (rechts).

Beim Sitz handelt es sich um einen originalen Fahrzeugsitz, um der teleoperierenden Person eine möglichst realgetreue Ergonomie und das damit verbundene Sitzgefühl zu vermitteln.

Die Bildschirme werden an einer separaten Monitorständer-Einheit angebracht und können unabhängig von der Basisplattform bewegt werden. Zum Einsatz kommen vier 48 Zoll-Bildschirme mit 4K-Auflösung. So kann ein großer Sichtdarstellungsbereich im Versuchsbetrieb abgedeckt werden, indem der Sichtbereich und/oder die Auflösung softwareseitig reduziert werden. Neben der Darstellung der Frontsicht (inkl. eingebetteter Rückspiegel) auf drei Bildschirmen bietet ein vierter Bildschirm Platz für die rückwärtige Sicht (wahlweise vergleichbar mit einer Rückfahrkamera oder einem Rückspiegel) sowie evtl. zusätzlich aktivierbare Sichten (z.B. Vogelperspektive).

Der aufgebaute und funktionsfähige prototypische experimentelle Leitstand ist in Bild 5 dargestellt.



Bild 5: Aufgebauter prototypischer experimenteller Leitstand.

7.2 Fahrsimulation und simuliertes Fahrzeug

Der Aufbau eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes weist eine Reihe von Ähnlichkeiten mit der Entwicklung einer realistischen Fahrsimulation auf: In beiden Fällen besteht die Herausforderung darin, die visuelle Information über die Verkehrsumgebung und das Fahrzeug der fahrzeugführenden bzw. teleoperierenden Person so zur Verfügung zu stellen, dass diese das virtuelle Fahrzeug situationsangepasst und sicher steuern kann.

Die Fahrsimulationssoftware SILAB wurde von der WIVW GmbH entwickelt und wird ständig weiter optimiert. Sie erlaubt die realitätsnahe Simulation des Steuerns eines Kraftfahrzeugs (z.B. Pkw oder Lkw). Daneben ermöglicht die Software eine wirklichkeitsnahe und individuelle Streckengestaltung mit frei definierbaren Straßentypen und Streckenverläufen sowie umfangreichen Möglichkeiten zur Darstellung von Verkehrssituationen und anderen Verkehrsteilnehmenden. Auf dieser Basis ist eine kontrollierte und reproduzierbare Gestaltung flexibler Versuchsszenarien zur Untersuchung des teleoperierten Fahrens möglich.

Für den experimentellen Versuchsbetrieb bietet SILAB die Möglichkeit, die Versuchsumgebung und das Interaktionskonzept individuell an den Untersuchungszweck anzupassen. Neben der Beeinflussung von Umweltbedingungen (Wetter, Jahres- und Tageszeit etc.) kann auch der Umgebungsverkehr präzise beeinflusst werden, um definierte Verkehrssituationen darzustellen. Auch das (fahrdynamische) Verhalten des teleoperierten Fahrzeugs selbst kann gewählt werden, sodass von Kleinwagen über Transporter bis hin zu Bussen oder Lkw das Fahrzeugverhalten basierend auf physikalischen Modellen realistisch dargestellt werden kann. In individuell angefertigten Szenarien können Bedingungen wie Fahrbahnmarkierungen, Beschilderung, Verkehrsteilnehmende und weitere Elemente an den jeweiligen Untersuchungszweck angepasst werden.

SILAB ist darüber hinaus offen für die Einbindung benötigter (Mess-)Systeme. Über flexible Schnittstellen (z.B. CAN-Bus, TCP/IP, UDP) können Hard- und Softwarekomponenten eingebunden werden. Die Software verfügt über eine Vielzahl vorbereiteter Schnittstellen für gängige Messtechnik-Hardware und Standardnebenaufgaben bzw. Untersuchungsverfahren (z.B. PDT, DRT, SuRT). Die Integration weiterer Softwarekomponenten ist mittels APIs für C/C++, JAVA und Ruby möglich. Alle verarbeiteten Daten können zeitsynchron aufgezeichnet werden, wodurch eine unkomplizierte Weiterverarbeitung bzw. Auswertung gewährleistet ist.

Durch die umfassende Beeinflussbarkeit von Komponenten und Darstellung deckt SILAB die geforderte Variabilität im Versuchsbetrieb (z.B. Einstellbarkeit von Latenzen zwischen simuliertem teleoperiertem Fahrzeug und Teleoperatorarbeitsplatz) ab und bietet darüber hinaus den Vorteil, dass einmal erstellte Szenarien unabhängig von realen Umweltbedingungen reproduzierbar befahren werden können.

Zur geplanten Einbindung des experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes in die Simulation werden insgesamt sechs Rechner für die Berechnung von Fahrzeugsimulation, Bild Darstellung und Zusatzfunktionen verwendet.

7.2.1 Datenübermittlung zwischen Leitstand und SILAB bzw. simuliertem Fahrzeug

Grundsätzlich verfügt SILAB über vorbereitete Schnittstellen, um Signale von Eingabegeräten wie bspw. Lenkrad und Pedalerie einzubinden. Diese Schnittstellen werden üblicher-

weise genutzt, um Signale aus Mockups für Fahrsimulatoren in der Fahrsimulationssoftware zu nutzen. Im Fall des prototypischen Teleoperatorarbeitsplatzes werden die gleichen Schnittstellen verwendet, um die Signale an das simulierte teleoperierte Fahrzeug zu übertragen.

Die Signalübertragung von den Eingabegeräten zur Simulation unterliegt einer technisch bedingten geringen Latenz. Darüberhinausgehende Latenzen, wie sie im Fall der realen Teleoperation z.B. durch eine nicht optimale Netzabdeckung zu erwarten sind, können ggf. softwareseitig künstlich erzeugt werden.

Gleiches gilt für die Übertragung von Kamerabildern und sonstigen Signalen vom Fahrzeug zum Leitstand. Während die Übertragung simulierter Umgebungsbilder und Fahrzeugsignale im umgesetzten experimentellen Leitstand kabelgebunden erfolgt, können in der Realität Qualitäts- und Zeitverluste durch die Datenübertragung über das Mobilfunknetz auftreten. Diese Verluste können im experimentellen Prototyp softwareseitig künstlich erzeugt und zu Untersuchungszwecken ggf. variiert werden.

7.2.2 Szenarien

Der aufgebaute prototypische experimentelle Leitstand erlaubt es, in unterschiedlichen Fahrumgebungen ein virtuelles Fahrzeug teleoperiert zu steuern. Die implementierten Szenarien umfassen eine Route in geschlossener Ortschaft (Umgebungsverkehr, Fußgänger, Abbiege- und Kreuzungsszenarien), eine Route über Land (Umgebungsverkehr, verschiedene Kurvenradien, Steigung/Gefälle) und eine Route auf der Autobahn (Umgebungsverkehr, Auffahrt/Abfahrt, Baustelle). Weitere Szenarien können jederzeit angepasst an spezifische Untersuchungszwecke erzeugt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils Screenshots der drei verschiedenen implementierten Strecken (vgl. Bild 6 – Bild 8).



Bild 6: Screenshots aus dem Szenario „Geschlossene Ortschaft“.



Bild 7: Screenshots aus dem Szenario „Über Land“.



Bild 8: Screenshot aus dem Szenario „Autobahn“.

Die Szenarien und Routen, die am prototypischen Leitstand implementiert werden, dienen u.a. folgenden Zwecken:

- Demonstration des Telefahrens
- Demonstration möglicher Versuchsszenarien eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes
- Exemplarische Demonstration der Einsatzmöglichkeiten simulationsgestützter Teleoperatorarbeitsplätze
 - Illustration des Einsatzes als Trainingswerkzeug
 - Gefährdungsloses Training zur Vorbereitung auf den beruflichen Alltag als Teleoperierende
 - Herstellung spezifischer Verkehrssituationen zur Erhöhung der Handlungssicherheit in kritischen Fahrsituationen und daraus resultierender Erhöhung der Fahr- und Verkehrssicherheit
 - Illustration des Einsatzes als Forschungsinstrument
 - Exemplarische, replizierbare Variation relevanter Einflussgrößen beim teleoperierten Fahren (z.B. Latenz, Qualität der Datenübertragung)
 - Exemplarische, replizierbare Variation der Verkehrssituation (z.B. Sichtbedingungen, Wetterverhältnisse)

Um mögliche spätere Trainingsziele oder besonders herausfordernde Situationen für eine experimentelle Überprüfung darzustellen, sind in den Szenarien auch Verkehrsteilnehmende integriert, die unaufmerksam fahren und Fehler machen. Dies erfordert vom Teleoperationspersonal entsprechend vorausschauendes und sicheres Fahren und das frühzeitige Erkennen von Fehlern anderer Verkehrsteilnehmende.

Die umgesetzten Szenarien illustrieren damit sowohl mögliche Situationen, die im Rahmen experimenteller Fahrten benutzt werden können, als auch potentielle Trainingssituationen.

7.3 Graphische Benutzeroberfläche und Bedienfunktionen

7.3.1 Interaktionskonzept für das Teleoperationspersonal

Das Interaktionskonzept basiert auf vier Bildschirmen, wobei drei Bildschirme zur Darstellung der Frontsicht sowie ein Bildschirm zur Darstellung der rückwärtigen Sicht und der zusätzlichen Sichten auf die Fahrsituation dienen.

Neben der Darstellung der eingelegten Fahrstufe und ggf. des aktuell genutzten Gangs, der gefahrenen Geschwindigkeit und des aktuellen Geschwindigkeitslimits in Form eines Geschwindigkeitsschilds, das bei Überschreitung zu blinken beginnt, wird der teleoperierenden Person in der zentralen Frontsicht die aktuelle Latenz sowie die aktuelle Verbindungsqualität angezeigt. Weiterhin werden die Fahrrichtungsanzeiger, der Zustand der Beleuchtungsanlage und eine evtl. aktive Assistenzsysteme (ACC, Spurhalteunterstützung) dargestellt. Weiterhin ist es möglich, die aktuelle Egotrajektorie des Fahrzeugs als zusätzliche Sichthilfe einzublenden. Ein Bremsassistent stellt bei Unterschreitung einer bestimmten Zeitlücke zu einem Vorderfahrzeug über eine entsprechende farbliche Darstellung die Kritikalität der aktuellen Fahrsituation dar.

Der vierte Bildschirm wird zur Darstellung der Rückansicht sowie zusätzlicher Sichten (z.B. Vogelperspektive, Rückfahrkamera) verwendet. Je nach Auswahl werden eine oder mehrere dieser Sichten zusätzlich zur Rückansicht dargestellt.

Zudem wird ein Touchdisplay zur Darstellung und Interaktion mit der grafischen Benutzeroberfläche verwendet, über das entsprechende Informationen über das gesteuerte Fahrzeug und die aktuelle Funkverbindung zwischen Fahrzeug und Leitstand abgerufen werden können und das teilweise zur Bearbeitung der sekundären Fahraufgabe (z.B. Bedienung von Licht und Hupe) verwendet wird. Die graphische Benutzeroberfläche (Bild 9) zeigt der teleoperierenden Person neben dem Teleoperationsmodus die aktuell gefahrene Geschwindigkeit, die eingelegte Fahrstufe und die Reichweite an. Daneben gibt es eine Reihe von Bedienfunktionen für sekundäre Fahraufgaben (z.B. Fahrzeugstart und –stopp, Notaus mit MRM, Warnblinker, Fahrstufe des Automatikgetriebes, Abblendlicht, Fernlicht, Reinigung Kameras bzw. Scheiben, Feststellbremse, Hupe). Standardmäßig ist weiterhin das Auswahlfeld „Kommunikationsverbindung“ ausgewählt und zeigt Parameter der aktuellen (simulierten) Verbindung zum (simulierten) Fahrzeug (d.h. Latenz und Verbindungsqualität).

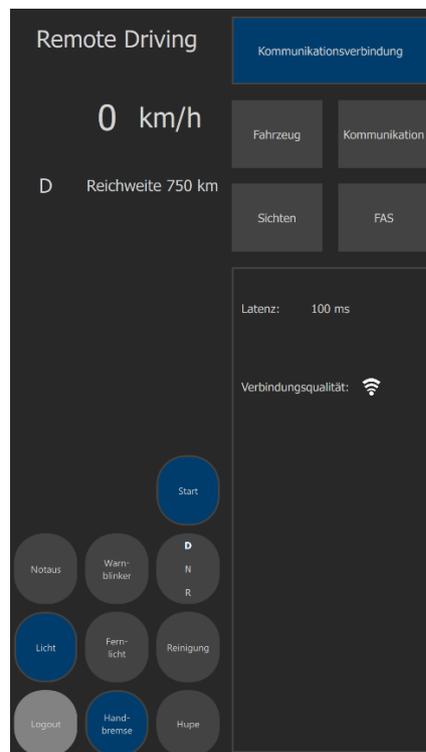


Bild 9: Graphische Benutzeroberfläche des Touchdisplays.

Zusätzlich verfügt das Touchdisplay über die Auswahlfelder „Fahrzeug“, „Kommunikation“, „Sichten“ und „FAS“, die jeweils ein Untermenü öffnen, sobald sie ausgewählt werden. Der Darstellung nach Auswahl dieser Felder wird Bild 10 dargestellt.

Beim gezeigten Stand handelt es sich um eine prototypische Umsetzung, die bei Bedarf inhaltlich und im Design an den Versuchszweck angepasst werden kann.

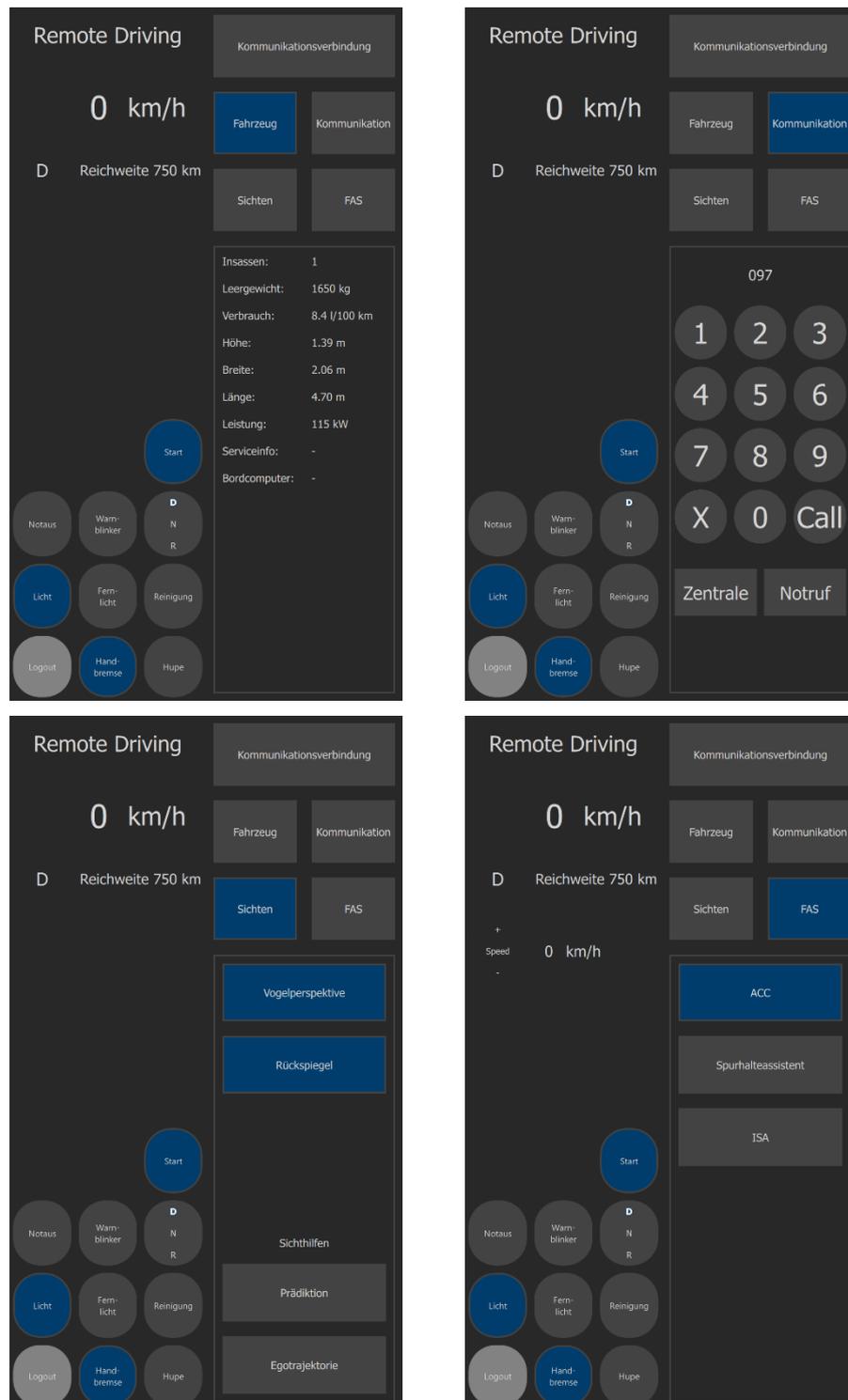


Bild 10: Graphische Benutzeroberfläche des Touchdisplays nach Aktivierung der Auswahlfelder „Fahrzeug“, „Kommunikation“, „Sichten“ und „FAS“.

Mit der Auswahl des Submenüs „Kommunikationsverbindung“ werden der teleoperierenden Person Informationen über die aktuelle Qualität der Funkverbindung, d.h. die Höhe der aktuellen Latenz (in numerischer Form) sowie die Verbindungsqualität (in grafischer Form), zwischen gesteuertem Fahrzeug und Leitstand präsentiert. Im Submenü „Fahrzeug“ werden detaillierte Informationen zum aktuell gesteuerten Fahrzeug (z.B. Art des Fahrzeugs, Abmessungen, Gesamtmasse, Verbrauch) angezeigt, während im Submenü „Kommunikation“ ein Tastenfeld zur Eingabe von Telefonnummern angezeigt wird. Hinsichtlich des Submenüs „Kommunikation“ wird dabei in der prototypischen Umsetzung zunächst lediglich die Möglichkeit zur Eingabe einer Nummer realisiert, jedoch nicht die eigentliche Anruffunktion. Im Submenü „Sichten“ führt die Auswahl der Vogelperspektive als zusätzliche Sicht zu einer entsprechenden Anzeige auf dem vierten Bildschirm. Äquivalent dazu führt die Auswahl des Menüpunkts „Rückspiegel“ zur Anzeige der Rückspiegelansicht an der entsprechenden Position auf dem vierten Bildschirm. Dabei können die Vogelperspektive und die Rückspiegelansicht auch gleichzeitig angezeigt werden. Zusätzlich stellt der Unterpunkt „Sichthilfen“ die Möglichkeit zur Verwendung weiterer Sichthilfen, d.h. die Aktivierung bzw. Deaktivierung der Egotrajektorienanstellung und die Anzeige der prädierten Egofahrzeugposition, zur Verfügung. Schließlich findet sich im Submenü „FAS“ (Fahrerassistenzsysteme) die Möglichkeit zur Aktivierung und Deaktivierung von Abstandsregeltempomat (ACC) und Spurhalteassistent. Der Zustand der beiden Systeme (aktiviert/deaktiviert) wird der teleoperierenden Person zusätzlich in der Frontsicht angezeigt.

7.3.2 Bedienkonzept für die Versuchsleitung

Vom Versuchsleitungsplatz aus wird der experimentelle Leitstand bedient. Dies beinhaltet zum einen die Auswahl und den Start von Fahrscenarien und zum anderen die Überwachung und Aufzeichnung relevanter Fahrdaten.

Das versuchsleitungsseitige Bedienkonzept ermöglicht die Auswahl und den Start ausgewählter, vordefinierter Fahrscenarien²⁶. Dabei legt die Auswahl des Fahrscenarios bereits das zu steuernde Fahrzeug und die Sichtdarstellung fest. Latenz und Jitter sowie die Bildqualität als relevante Einflussfaktoren sind innerhalb vorgegebener Grenzen einstellbar. Darüber hinaus erlaubt die Bedienoberfläche die Auswahl von ggf. vordefinierten Aufsetzpunkten innerhalb des Szenarios sowie von aufzuzeichnenden Fahrparametern.

Des Weiteren ermöglicht das Bedienkonzept nach dem Start der Simulation die Online-Überwachung relevanter interessierender Untersuchungsparameter. Diese werden abhängig vom Datentyp in numerischer, textueller und ggf. auch visualisierter Form direkt während der Fahrt angezeigt.

7.3.3 Variierbarkeit teleoperationsrelevanter Einflussfaktoren

Die Vorteile eines experimentellen Leitstands, der auf einer Fahrscenarioumgebung beruht, liegen darin, dass eine Reihe von Parametern, die das Telefahren beeinflussen, unter kontrollierten Bedingungen variiert werden können. Auf diese Weise lassen sich z.B. die

²⁶ Bemerkung: Da die softwareseitige Umsetzung auf der Simulationssoftware SILAB beruht, ist eine Anpassung, Erweiterung und Definition neuer Szenarien und Strecken über die vordefinierten Fahrscenarien hinaus flexibel möglich.

Effekte auf die Fahrperformanz und den Workload des Teleoperationspersonals untersuchen.

Die prototypische Umsetzung des experimentellen Leitstands erlaubt die experimentelle Variation einer Reihe von Faktoren, die mutmaßlich einen großen Einfluss auf die Telefahrt haben:

- Latenz Uplink: Die Verzögerung von Bedieneingaben der teleoperierenden Person das virtuelle Fahrzeug kann stufenlos von 0 ms bis zu einer beliebigen Höhe eingestellt werden. Die teleoperierende Person bemerkt dies nicht nur aufgrund der verzögerten Reaktion des gesteuerten Fahrzeugs, sondern auch über eine entsprechende Veränderung der Darstellung der Latenz in der Frontsicht und auf dem Touchdisplay.
- Videoqualität: Die Flüssigkeit der Videodarstellung kann über die Anzahl der dargestellten Bilder pro Sekunde variiert werden. Die teleoperierende Person bemerkt nicht nur das Ruckeln in der Darstellung, sondern wird auch über ein verändertes Icon der Verbindungsqualität auf die schlechtere Videoqualität hingewiesen.
- Position Rückansichten/Außenspiegel: Die Rückansichten können frei positioniert werden (Bild 11).



Bild 11: Rückansicht am äußeren (links) bzw. am inneren (rechts) Rand des linken und rechten Bildschirms.

- Anzeige Vogelperspektive: Als zusätzliche Perspektive auf das direkte Umfeld des gefahrenen Fahrzeugs kann eine Vogelsicht angezeigt werden (Bild 12).



Bild 12: Darstellung von Vogelperspektive und Rückfahrkamera auf dem vierten Bildschirm.

- Assistenz bei Längsführung durch ACC: Die telefahrende Person kann sich bei der Längsführung des Fahrzeugs durch ein ACC unterstützen lassen. Nach Aktivierung übernimmt das System die aktuelle Fahrgeschwindigkeit als Set-Speed. Diese kann durch entsprechende Bedienfelder auf dem Touchdisplay in 5 km/h-Schritten erhöht oder verringert werden.

- Assistenz bei Längsführung durch ISA: Die teleoperierende Person kann sich beim Einhalten der vorgeschriebenen Geschwindigkeitslimits durch einen intelligenten Geschwindigkeitsassistenten assistieren lassen. Neben der Darstellung des aktuellen Limits blinkt das entsprechende Icon, sobald die erlaubte Höchstgeschwindigkeit überschritten wird. Bei anhaltender Überschreitung wird ein Warnton ausgegeben.

Grundsätzlich sind der Variation von möglichen Einflussfaktoren kaum Grenzen gesetzt.

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden auf Basis einer Literaturanalyse zum Stand der Forschung bzgl. der Mensch-Maschine-Interaktion bei der teleoperierten Fahrzeugführung und einer Recherche zu bestehenden Teleoperatorarbeitsplätzen zunächst Teilsysteme identifiziert, deren Gestaltung entscheidend für die Auslegung entsprechender Leitstände ist. In jedem dieser Bereiche sind spezifische Anforderungen zu erfüllen, um eine sichere Teleoperation des Fahrzeugs zu ermöglichen.

Da die Datenlage an empirischen Ergebnissen häufig nicht ausreicht, um Mindestanforderungen für die verschiedenen Teilsysteme zu formulieren, wurden neben den vorliegenden Forschungsergebnissen auch bewährte Vorgehensweisen aus der Praxis (i.S. eines Stands der Technik) und einschlägige Richtlinien und Rechtsgrundlagen (z.B. Richtlinien zur Arbeitsplatzgestaltung, Vorgaben für die Typgenehmigung von Fahrzeugen) zur Anforderungsdefinition herangezogen. Als Ergebnis liegt eine Liste an Mindestanforderungen an die Gestaltung von Teleoperatorarbeitsplätzen vor, die die Bereiche Sichtdarstellung (z.B. 180° horizontaler Frontsichtbereich, Darstellung der Egofahrtrajektorie), räumliche Gestaltung, akustische Darstellung der Fahrsituation, Leitstand inkl. Bedienelemente, Unterstützungssysteme (z.B. Auslösung Minimal Risk Maneuver, Spurhalteassistentz), grafische Benutzeroberfläche (z.B. Informationen zu Fahrt und Fahrzeugzustand), Überwachung der Teleoperation (z.B. Datenaufzeichnung, Aufmerksamkeitserkennung der teleoperierenden Person, Incident Management), Kommunikationsverbindung (z.B. Latenz < 300 ms, Kommunikationsmöglichkeit mit anderen Personen) und Abnahme des Teleoperatorarbeitsplatzes (z.B. Verträglichkeit im Hinblick auf die Ausbildung von Bewegungskrankheit, Fahr-sicherheit) umfasst.

Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass die Basis an empirischen Untersuchungen zwar aktuell signifikant wächst, aber viele teleoperationsspezifische Fragestellungen noch nicht ausreichend beantwortet sind und erheblicher Forschungsbedarf besteht. Deshalb wurden neben den Mindestanforderungen für die Gestaltung von (ideal-typischen) Teleoperatorarbeitsplätzen außerdem Anforderungen an einen experimentellen Leitstand erarbeitet. Dieser deckt zum einen die Mindestanforderungen ab, ermöglicht aber auch ein Über- oder Unterschreiten dieser Anforderungen, um die Auswirkungen einer Variation von Rahmenbedingungen untersuchbar zu machen.

Aus den Anforderungen an einen experimentellen Leitstand wurde ein konkretes technisches Konzept abgeleitet, das am WIVW in Form eines prototypischen experimentellen Leitstands umgesetzt wurde. Mit diesem Leitstand kann ein virtuelles Fahrzeug in der Fahrsimulation teleoperiert gesteuert werden. So können verschiedene Bedingungen (z.B. verfügbare Sichten, Latenz bei der Signalübertragung) variiert und die entsprechenden Auswirkungen systematisch untersucht werden. Hierbei bietet die Einbindung in die Fahrsimulation den Vorteil, dass Szenarien vollumfänglich an das jeweilige Untersuchungsziel angepasst werden können und jederzeit reproduzierbar sind.

Durch die Inbetriebnahme des prototypischen experimentellen Leitstands konnte gezeigt werden, dass teleoperationsspezifische Effekte bzw. deren Variation (z.B. sich ändernde Latenzen) in der Simulation erlebbar gemacht werden können. Somit steht als Ergebnis

der Entwicklung ein vielseitig einsetzbares Untersuchungswerkzeug zur Verfügung, das sich zur Untersuchung einer Vielzahl an Fragestellungen eignet.

Mit dem experimentellen Leitstand kann so zukünftig ein Beitrag dazu geleistet werden, die empirische Datenlage bzgl. Fragestellungen zur sicheren Teleoperation von Fahrzeugen zu erweitern. Darüber hinaus eignet sich der Aufbau zu Demonstrationszwecken, um ein Verständnis für die spezifischen Herausforderungen der Teleoperation zu schaffen und kann zukünftig gegebenenfalls auch zum gezielten Training von Teleoperationspersonal eingesetzt werden.

Literatur

- Adamides, G., Katsanos, C., Parmet, Y., Christou, G., Xenos, M., Hadzilacos, T., & Edan, Y. (2017). HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer. *Applied ergonomics*, 62, 237–246.
- Bodell, O., & Gullikson, E. (2016). Teleoperation of Autonomous Vehicle With 360° Camera Feedback.
- BSI (2021). PAS 1884: Safety operators in automated vehicle testing and trialling – Guide. British Standards Institution
- BSI (2023). Flex 1886: System aspects for remote operation of vehicles – Guide. British Standards Institution
- Buchholz, M., Gies, F., Danzer, A., Henning, M., Hermann, C., Herzog, M., & weitere (2020). Automation of the UNICARagil vehicles. In 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility (Vol. 2, pp. 1531-1560). Universität Ulm.
- Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (2025). Abschlussbericht der Arbeitsgruppe „Forschungsbedarf Teleoperation“. Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, Unterreihe „Fahrzeugtechnik“, Heft F 166a. Bergisch Gladbach. DOI: <https://doi.org/10.60850/bericht-f166a>
- Chen, J. Y., Haas, E. C., & Barnes, M. J. (2007). Human performance issues and user interface design for teleoperated robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1231–1245.
- Chew, J. Y., Kawamoto, M., Okuma, T., Yoshida, E., & Kato, N. (2021). Adaptive attention-based human machine interface system for teleoperation of industrial vehicle. *Scientific reports*, 11(1), 17284.
- Chi, H.-L., Chen, Y.-C., Kang, S.-C., & Hsieh, S.-H. (2012). Development of user interface for tele-operated cranes. *Advanced Engineering Informatics*, 26(3), 641–652.
- Chucholowski, F. (2015). Eine vorausschauende Anzeige zur Teleoperation von Straßenfahrzeugen. PhD thesis, Technische Universität München, München.
- Chucholowski, F., Gnatzig, G., Tang, T., Hosseini, A., & Lienkamp, M. (2013). Teleoperiertes Fahren-Aktuelle Entwicklungen. 6. Tagung Fahrerassistenz.
- Chucholowski, F., Tang, T., & Lienkamp, M. (2014). Teleoperiertes fahren sichere und robuste datenverbindungen. *ATZelextronik*, 9(1), 60–63.
- D’Orey, P. M., Hosseini, A., Azevedo, J., Diermeyer, F., Ferreira, M., & Lienkamp, M. (2016, June). Hail-a-Drone: Enabling teleoperated taxi fleets. In 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (pp. 774-781). IEEE.
- Designated Driver (2019). <https://designateddriver.ai> (Stand: 23.08.2022).
- De Winter, J., van Leeuwen, P. M., & Happee, R. (2012, August). Advantages and disadvantages of driving simulators: A discussion. In *Proceedings of measuring behavior* (Vol. 2012, p. 8th).

- DLR (2022). Teleoperation hilft, wenn das autonome Fahrzeug nicht weiterweiß. https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/02/20220405_teleoperation-hilft-wenn-das-autonome-fahrzeug-nicht-weiterweiss (Stand: 17.04.2024).
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und evaluation*. Wiesbaden: Springer.
- DriveU.auto (2022). <https://driveu.auto/> (Stand: 23.08.2024).
- Dybvik, H., Løland, M., Gerstenberg, A., Slåttsveen, K. B., & Steinert, M. (2021). A low-cost predictive display for teleoperation: Investigating effects on human performance and workload. *International Journal of Human-Computer Studies*, 145, 102536.
- Einride (2024). <https://einride.tech/autonomous/remote-operation> (Stand: 17.04.2024).
- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). *Proceedings of the IEEE 1988 national aerospace and electronics conference*, 789–795.
- Endsley, M. R., Bolté, B., & Jones, D. G. (2003). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design* (2. Aufl.). CRC press.
- Fernride (2024). Human-Assisted Autonomy. <https://www.fernride.com/system> (Stand: 17.04.2024).
- Frey, A. (2016). Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, F 115, Fachverlag NW.
- Georg, J.-M., Feiler, J., Diermeyer, F., & Lienkamp, M. (2018). Teleoperated driving, a key technology for automated driving? Comparison of actual test drives with a head mounted display and conventional monitors. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 3403–3408.
- Georg, J.-M., Putz, E., & Diermeyer, F. (2020). Longtime effects of videoquality, videocanvases and displays on situation awareness during teleoperation of automated vehicles. 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 248–255.
- Gnatzig, S. (2015). *Trajektorienbasierte teleoperation von straßenfahrzeugen auf basis eines shared-control-ansatzes* [PhD Thesis]. Technische Universität München.
- Goodall, N. (2020). Non-technological challenges for the remote operation of automated vehicles. *Transportation research part A: policy and practice*, 142, 14-26.
- Graf, G., Abdelrahman, Y., Xu, H., Abdrabou, Y., Schitz, D., Hußmann, H., & Alt, F. (2020). The Predictive Corridor: A Virtual Augmented Driving Assistance System for Teleoperated Autonomous Vehicles. *ICAT-EGVE*, 61–69.
- Graf, G., Palleis, H., & Hussmann, H. (2020). A design space for advanced visual interfaces for teleoperated autonomous vehicles. *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*, 1–3.
- Habibovic, A., Andersson, J., Castor, M., Meiby, L., & Rizgary, D. (2020). Human factors related to remote control of automated heavy vehicles. *SAFER Prestudies: final report*.
- Hilgert, J. (2005). *Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zur experimentellen Eigenschaftsabsicherung eines Bahnplanungsverfahrens für Fahrzeugführungssysteme* [PhD Thesis]. Universität Duisburg-Essen.

- Hofbauer, M., Kuhn, C. B., Petrovic, G., & Steinbach, E. (2020). Telecarla: An open source extension of the CARLA simulator for teleoperated driving research using off-the-shelf components. In 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (pp. 335-340). IEEE.
- Hoffmann, S., & Diermeyer, D. F. (2021). Systems-theoretic safety assessment of teleoperated road vehicles. arXiv preprint arXiv:2104.06795.
- Hosseini, A. (2018). Conception of Advanced Driver Assistance Systems for Precise and Safe Control of Teleoperated Road Vehicles in Urban Environments [PhD Thesis]. Technische Universität München.
- Hosseini, A., & Lienkamp, M. (2015). Fahrerassistenzsysteme zur präzisen und sicheren Steuerung von teleoperierten Straßenfahrzeugen. 7. Tagung Fahrerassistenz.
- Hosseini, A., Richthammer, F., & Lienkamp, M. (2016). Predictive haptic feedback for safe lateral control of teleoperated road vehicles in urban areas. In 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring) (pp. 1-7). IEEE.
- Hunsicker, F., Pelzer, G. & Zankl, M. (2021) - Shuttle-Modellregion Oberfranken. Der Nahverkehr 2021(6), 30-34.
- Kalaiyarasan, A., Simpson, B., Jenkins, D., Mazzeo, F., Hao, Y., Obazele, I., Kourantidis, K., Courtier, M., Wong, M. C. S., Ball, P. & Wilford, R. (2021). Remote operation of connected and automated vehicles.
- Kallioniemi, P., Burova, A., Mäkelä, J., Keskinen, T., Ronkainen, K., Mäkelä, V., Hakulinen, J., & Turunen, M. (2021). Multimodal warnings in remote operation: The case study on remote driving. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(8), 44.
- Kamaraj, A. V., Domeyer, J. E., & Lee, J. D. (2021, September). Hazard analysis of action loops for automated vehicle remote operation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 65, No. 1, pp. 732-736). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Kang, L., Zhao, W., Qi, B., & Banerjee, S. (2018). Augmenting self-driving with remote control: Challenges and directions. *Proceedings of the 19th international workshop on mobile computing systems & applications*, 19–24.
- Kettwich, C., Schrank, A., & Oehl, M. (2021). Teleoperation of highly automated vehicles in public transport: User-centered design of a human-machine interface for remote-operation and its expert usability evaluation. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(5), 26.
- Klink, J. (2021). Teleoperation-When is it Going to Happen?. *ATZ worldwide*, 123(4), 70-70.
- Le, Q. S., Borowsky, A., Arogeti, S., & Parmet, Y. (2023). Comparing participants' risk perception and sensed presence while driving in CARLA and a self-developed remote driving testbed. In: D. de Waard, V. Hagemann, L. Onnasch, A. Toffetti, D. Coelho, A. Botzer, M. de Angelis, K. Brookhuis, and S. Fairclough. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Conference*.
- Lu, S., Zhang, M. Y., Ersal, T., & Yang, X. J. (2019). Workload management in teleoperation of unmanned ground vehicles: Effects of a delay compensation aid on human operators' workload and teleoperation performance. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(19), 1820–1830.

Luo, Y., Wang, J., Liang, H.-N., Luo, S., & Lim, E. G. (2021). Monoscopic vs. Stereoscopic views and display types in the teleoperation of unmanned ground vehicles for object avoidance. 2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN), 418–425.

Matts, T., & Sterner, A. (2020). Vision-based Driver Assistance Systems for Teleoperation of OnRoad Vehicles: Compensating for Impaired Visual Perception Capabilities Due to Degraded Video Quality.

Mutzenich, C., Durant, S., Helman, S., & Dalton, P. (2021). Updating our understanding of situation awareness in relation to remote operators of autonomous vehicles. *Cognitive research: principles and implications*, 6(1), 1–17.

Neumeier, S., Wintersberger, P., Frison, A.-K., Becher, A., Facchi, C., & Riener, A. (2019). Teleoperation: The holy grail to solve problems of automated driving? Sure, but latency matters. *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 186–197.

O’Kelly, M., Sukhil, V., Abbas, H., Harkins, J., Kao, C., Pant, Y. V., Mangharam, R., Agarwal, D., Behl, M., Burgio, P., & Bertogna, M. (2019). F1/10: An open-source autonomous cyber-physical platform. *arXiv preprint arXiv:1901.08567*.

Ottopia (2022). Enabling driverless experiences. <https://www.ottopia.tech/> (Stand: 23.08.2022).

Ouden, J. d., Ho, V., Smagt, T. v. d., Kakes, G., Rommel, S., Passchier, I., Juza, J., & Tafur Monroy, I. (2022). Design and Evaluation of Remote Driving Architecture on 4G and 5G Mobile Networks. *Frontiers in Future Transp.* Vol. 2, Art. 801567. Doi: 10.3389/ffutr.2021.801567

Saez-Perez, J., Wang, Q., Alcaraz-Calero, J.M., & Garcia-Rodriguez, J. (2023). Design, Implementation, and Empirical Validation of a Framework for Remote Car Driving Using a Commercial Mobile Network. *Sensors* 2023, 23, 1671. Doi: 10.3390/s23031671

Pohjala, J. (2016). Small teleoperated vehicles: study of potential use cases and empirical prototyping.

Phantom Auto (2022). Drivers can work remotely, too. <https://phantom.auto/> (Stand: 23.08.2022).

Pongrac, H. (2011). Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden [PhD Thesis]. Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr.

Rauch, N. (2009). Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von situationsbewusstsein im Fahrkontext [PhD Thesis]. Universität Würzburg.

Rea, D. J., & Young, J. E. (2019). Backseat teleoperator: Affective feedback with on-screen agents to influence teleoperation. 2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 19–28.

Roboauto (2022). <https://roboauto.tech/> (Stand: 23.08.2022).

SAE (2018). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0107>

- Schimpe, A., Feiler, J., Hoffmann, S., Majstorović, D., & Diermeyer, F. (2022a). Open source software for teleoperated driving. In: 2022 International Conference on Connected Vehicle and Expo (ICCVE) (S. 1-6). IEEE.
- Schimpe, A., Majstorovic, D., & Diermeyer, F. (2022b). Steering Action-aware Adaptive Cruise Control for Teleoperated Driving. In: 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 988-993). IEEE.
- Schimpe, A., Hoffmann, S., & Diermeyer, F. (2021). Adaptive video configuration and bitrate allocation for teleoperated vehicles. 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops), 148–153.
- Schippers, H., Böcker, S., & Wietfeld, C. (2023). Data-Driven Digital Mobile Network Twin Enabling Mission-Critical Vehicular Applications. In: 97th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring). IEEE.
- Silva, Y. M. L. R., Simões, W. C. S. S., Naves, E. L. M., Bastos Filho, T. F., & De Lucena, V. F. (2018). Teleoperation training environment for new users of electric powered wheelchairs based on multiple driving methods. IEEE Access, 6, 55099–55111.
- Soliton (2022). Teledriving. <https://www.solitonsystems.com/low-latency-video/remote-operation/remote-driving> (Stand: 23.08.2022).
- Suomela, J. (2001). Tele-presence aided teleoperation of semi-autonomous work vehicles. Licenciate thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- Tang, T. (2015). Methods for improving the control of teleoperated vehicles [PhD Thesis]. Technische Universität München.
- Thomason, J., Ratsamee, P., Kiyokawa, K., Kriangkomol, P., Orlosky, J., Mashita, T., Uranishi, Y., & Takemura, H. (2017). Adaptive view management for drone teleoperation in complex 3D structures. Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces, 419–426.
- UNICARAGIL KONSORTIUM (2023). UNICARagil – Das Konzept. <https://www.unicaragil.de/de/projektinformationen.html?modul=dynamic#konzept>. Zuletzt abgerufen am 28.08.2023.
- VandenBos, G. R. (2007). APA dictionary of psychology. American Psychological Association.
- Vay (2022). Ein neuer Ansatz für fahrerlose Mobilität. <https://vay.io/de/> (Stand: 23.08.2022).
- Voysys (2022). <https://www.voysys.se/> (Stand: 23.08.2022).
- Worthoff, R. & Siemes, W. (2012). Grundbegriffe der Verfahrenstechnik. Wiley-VCH.
- Yu, Y., & Lee, S. (2022). Remote Driving Control With Real-Time Video Streaming Over Wireless Networks: Design and Evaluation. IEEE Access, Vol. 10, 2022. Doi: 10.1109/ACCESS.2022.3183758

Bilder

Bild 1: Gefundene Artikel in Google Scholar (<https://scholar.google.com>) mit den Suchkriterien („*vehicle*“ & „*remote driving*“) und („*vehicle*“ & „*teleoperated driving*“); Stand von Januar 2024.

Bild 2: Vorgehen zum Ableiten zusätzlicher Anforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze.

Bild 3: Fahrzeugähnliche Anordnung von Sitz, Lenkrad und Pedalerie (links) und Gesamtaufbau (rechts) des prototypischen experimentellen Leitstands.

Bild 4: Basisplattform mit hervorgehobener Lenkradeinheit (Mitte) und Pedalerieeinheit (rechts).

Bild 5: Aufgebauter prototypischer experimenteller Leitstand.

Bild 6: Screenshots aus dem Szenario „Geschlossene Ortschaft“.

Bild 7: Screenshots aus dem Szenario „Über Land“.

Bild 8: Screenshot aus dem Szenario „Autobahn“.

Bild 9: Graphische Benutzeroberfläche des Touchdisplays.

Bild 10: Graphische Benutzeroberfläche des Touchdisplays nach Aktivierung der Auswahlfelder „Fahrzeug“, „Kommunikation“, „Sichten“ und „FAS“.

Bild 11: Rückansicht am äußeren (links) bzw. am inneren (rechts) Rand des linken und rechten Bildschirms.

Bild 12: Darstellung von Vogelperspektive und Rückfahrkamera auf dem vierten Bildschirm.

Tabellen

Tab. 1: Definition von Telefahren und Teleassistenz.

Tab. 2: Kompensierende Maßnahmen.

Tab.3: Überblick zur Befundlage bzgl. des Einflusses verschiedener Faktoren auf Workload, Situationsbewusstsein und Performanz von teleoperierenden Personen.

Tab. 4: In der Literatur beschriebene Leitstände bzw. Teleoperatorarbeitsplätze für Forschungszwecke.

Tab. 5: Von im Bereich der Teleoperation tätigen Firmen beschriebene Leitstände bzw. Teleoperatorarbeitsplätze.

Tab. 6: In der Literatur beschriebene Benutzeroberflächen von Teleoperatorarbeitsplätzen zu Forschungszwecken.

Tab. 7: Von im Bereich der Teleoperation tätigen Firmen beschriebene Benutzeroberflächen von Teleoperatorarbeitsplätzen.

Tab. 8: Zu spezifizierende Teilsysteme von Teleoperatorarbeitsplätzen.

Tab. 9: Vorgeschlagene Mindestanforderungen an Teleoperatorarbeitsplätze.

Tab. 10: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Übernehmen eines unbeaufsichtigten Pkw“.

Tab. 11: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Kommunikation mit anderem Fahrzeug“.

Tab. 12: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Plötzliche Wetter- und Sichtverschlechterung“.

Tab. 13: Empfehlungen für eine sichere Ausgestaltung des Teleoperatorarbeitsplatzes für den Anwendungsfall „Rechtsabbiegemanöver Lkw“.

Tab. 14: Fünf Schritte quantitativer Datenanalysen.

Tab. 17: Übersicht über Anforderungen an experimentelle Leitstände.

Tab. 18: Anforderungen für den Hardwareaufbau eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes.

Tab. 19: Anforderungen an den Versuchsleitungsplatz.

Tab. 20: Anforderungen an Bedien- und Konfigurierbarkeit eines experimentellen Teleoperatorarbeitsplatzes.

Tab. 21: Anforderungen an die Software von teleoperiertem Fahrzeug und experimentellem Leitstand.

Tab. 22: Anforderungen an die Schnittstelle zwischen teleoperiertem Fahrzeug und experimentellem Leitstand.

Tab. 23: Anforderungen an die modulare Fahrplattform in realgetreuer Größe.

Tab. 24: Anforderungen an eine modulare skalierte Fahrplattform.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2023

F 150: Fahrerassistenzsysteme für die Geschwindigkeitsreduzierung bei schlechten Bedingungen

Pohle, Günther, Schütze, Trautmann

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

F 151: Integration von öffentlichem und privatem Parkraummanagement

Höpping, Jonas, Becker, Krüger, Freudenstein, Krampe, Godschachner, Inninger, Scholz, Hüttner, Grötsch, Stjepanovic

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

F 152: On-Board-Diagnose (OBD) – Analyse der OBD in Bezug auf zukünftig verfügbare Emissionsdaten für die Periodische Technische Inspektion (PTI)

Hausberger, Matzer, Lipp, Blassnegger, Hametner, Prosenec

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

2024

F 153: Zusammenstellung geeigneter Sicherheitsindikatoren für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion von Level 3 Systemen

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

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

F 153b: Compilation of suitable safety indicators for the evaluation of Human-Machine Interaction of level 3 systems

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

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

F 154: Systematisierung geeigneter fahrfremder Tätigkeiten für automatisiertes Fahren von schweren Güterkraftfahrzeugen

Flämig, Beck, Hoffmann, Tjaden, Höger, Brandt, Haase, Wolter, Müller, Damer, Hettich, Schnücker

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

F 155: Handbuch Rollstuhlbeförderung bei Ausschreibungen

Boenke, Deuster

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

F 156: Entwicklung eines Konzepts und Lastenheftes für eine Szenariendatenbank zur Bewertung der Sicherheitswirkung hochautomatisierter Fahrfunktionen

Klinge, Krampitz, Ehrich, Siemon, Wiegand, Lassowski, Stavesand, Simon

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

F 157: Statistischer und methodischer Ansatz zur Erhebung vertiefter Verkehrsunfalldaten

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer

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

F 158: Wissenschaftliche Begleitung der Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr

Unger, Grosche, Rößler, Uhlenhof, Bierbach, Huster, Panwinkler, Straßgütli, Suing, Zelazny

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

F 159: Pilotprojekt zu Emissionsmessungen mittels Remote Sensing Devices

Hager, Kathmann, Brandt, Roggendorf, Scharrenbroich, Borken-Kleefeld

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

2025

F 160: Verbesserte Unfallrekonstruktion durch zusätzliche Anknüpfungstatsachen und KI

Breitlauch, Erbsmehl, Schramm, Urban, Hauck, Sinen, Espig, Walter, Jänsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 161: Datenverknüpfung zur Erfassung von Fahrzeugausstattungen in GIDAS

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

F 162: Motorrad Kurven-ABS MOKABS

Erlinger, Kraut, Tomasch, Ausserer, Rieß, Kaufmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 163a: Anhänger mit elektrisch angetriebener Unterstützungssachse

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

F 163b: Trailers with an electrically powered support axle

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

F 164: Methodenstudie zur Konzeption der Fahrleistungserhebung 2026

Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Wyrich, Eisenmann, Nobis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 165: Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

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

F 166a: Forschungsbedarf Teleoperation

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

F 167: Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-869-0
<https://doi.org/10.60850/bericht-f167>

www.bast.de