

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN HAMBURG

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK

---

Analyse der Herausforderungen und Chancen der  
Teleoperation in der Logistik mit Schwerpunkt auf  
der Mensch-Maschinen-Interaktion und dem Aspekt  
der Nachhaltigkeit (Industrie 5.0)

---

BACHELORARBEIT

eingereicht von

David Westfal



|                    |   |
|--------------------|---|
| <b>Erstprüfer</b>  | PROF. ENGEL                                   |
| <b>Zweitprüfer</b> | PROF. FRENKEL                                 |
|                    | Department Fahrzeugtechnik<br>und Flugzeugbau |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Matrikelnummer</b> |  |
| <b>Studienfach</b>    | Fahrzeugtechnik   |
| <b>Kontaktdetails</b> | David.Westfal@haw-hamburg.de  |
| <b>Abgabedatum</b>    | 07.09.2024  |

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit befasst sich mit der Teleoperation von autonomen Fahrzeugen mit besonderem Schwerpunkt auf der Mensch-Maschinen-Interaktion. Mittels einer Einordnung der Begrifflichkeiten von Industrie 5.0, dem autonomen Fahren sowie der Teleoperation selbst wird die Notwendigkeit in der Anwendung dieser Technologie begründet. Anschließend werden die Herausforderungen der Situationswahrnehmung und Latenz vorgestellt als auch potenzielle Lösungsmöglichkeiten erörtert. Zusätzlich wird auf den Aspekt der Nachhaltigkeit im Kontext der Teleoperation von autonomen Fahrzeugen eingegangen. Abschließend erfolgt ein Ausblick über die in Zukunft relevanten Themengebiete hinsichtlich der bestehenden Herausforderungen der Teleoperation.

### **Title der Arbeit**

Analyse der Herausforderungen und Chancen der Teleoperation in der Logistik mit Schwerpunkt auf der Mensch-Maschinen-Interaktion und dem Aspekt der Nachhaltigkeit (Industrie 5.0)

### **Stichworte**

Teleoperation, autonomes Fahren, Industrie 5.0, Mensch-Maschinen-Interaktion, Nachhaltigkeit

## **Abstract**

This paper deals with the teleoperation of autonomous vehicles, with a special focus on human-machine interaction. By defining the terms of Industry 5.0, autonomous driving, and teleoperation itself, the necessity of applying this technology is justified. Subsequently, the challenges of situation awareness and latency are presented, as well as potential solutions discussed. Additionally, the aspect of sustainability in the context of the teleoperation of autonomous vehicles is addressed. Finally, an outlook is provided on the areas of relevance in the future with regard to the existing challenges of teleoperation.

## **Title of the Thesis**

Analysis of Challenges and Opportunities of Teleoperation in Logistics with a Focus on Human-Machine Interaction and Sustainability (Industry 5.0)

## **Keywords**

Teleoperation, Autonomous Driving, Industry 5.0, Human-Machine Interaction, and Sustainability

# Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Einleitung .....   | 1  |
| 2     | Theoretischer Hintergrund .....  | 3  |
| 2.1   | Industrie 5.0 .....  | 3  |
| 2.1.1 | Geschichte der Industriellen Revolutionen .....                              | 3  |
| 2.1.2 | Konflikte der Industrie 4.0 .....  | 5  |
| 2.1.3 | Ansatz der Industrie 5.0 .....   | 5  |
| 2.2   | Autonomes Fahren .....   | 7  |
| 2.2.1 | Stufen der Automatisierung der SAE .....                                     | 8  |
| 2.2.2 | Notwendigkeit der Teleoperation .....  | 9  |
| 2.2.3 | Herausforderungen des Autonomen Fahrens .....                                | 10 |
| 2.3   | Definition der Teleoperation .....   | 10 |
| 2.4   | Konzepte der Teleoperation .....   | 13 |
| 2.4.1 | Direct Control .....   | 14 |
| 2.4.2 | Shared Control .....   | 14 |
| 2.4.3 | Trajectory Guidance .....  | 15 |
| 2.4.4 | Waypoint Guidance .....  | 17 |
| 2.4.5 | Interactive Path Planning .....  | 17 |
| 2.4.6 | Perception Modification .....  | 19 |
| 2.5   | Systemarchitektur der Teleoperation .....                                    | 20 |
| 2.5.1 | Grundaufbau der Systemarchitektur .....                                      | 20 |
| 2.5.2 | Varianten der Systemarchitektur .....  | 21 |
| 2.6   | Anwendungsgebiete der Teleoperation .....                                    | 23 |
| 2.6.1 | Anwendungen im Öffentlichen Bereich .....                                    | 23 |
| 2.6.2 | Anwendungen im nicht-Öffentlichen Bereich .....                              | 24 |
| 2.7   | Gesetzgebung .....   | 24 |
| 2.7.1 | Internationale Gesetzgebung .....  | 25 |
| 2.7.2 | Europäische Gesetzgebung .....   | 26 |
| 2.7.3 | Deutsche Gesetzgebung .....  | 26 |
| 3     | Herausforderungen der Teleoperation .....                                    | 28 |
| 3.1   | Situationsbewusstsein .....  | 29 |
| 3.1.1 | Out of the Loop Syndrome (OOTL) .....  | 30 |
| 3.1.2 | Arbeitsbelastung .....   | 30 |
| 3.2   | Latenz .....   | 31 |
| 3.2.1 | Einfluss der Latenz auf Fahrleistung und Mentale Arbeitsbe-<br>lastung ..... | 32 |
| 3.2.2 | Einfluss der Latenz auf Emotionale Zustände .....                            | 33 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.3   | Mitarbeiterqualifikation .....                              | 33 |
| 4     | Lösungsansätze der Teleoperation .....                      | 34 |
| 4.1   | Situationswahrnehmung .....                                 | 34 |
| 4.1.1 | Visuelles-Feedback .....                                    | 34 |
| 4.1.2 | Lenkkraft-Feedback .....                                    | 39 |
| 4.1.3 | Motion Cueing-Feedback .....                                | 42 |
| 4.1.4 | Vibrations- und Audiofeedback .....                         | 46 |
| 4.1.5 | Neuartige Benutzer-Fahrzeug-Schnittstellen .....            | 46 |
| 4.2   | Latenz .....  | 47 |
| 4.2.1 | Videovorhersage und -Korrektur .....                        | 48 |
| 4.2.2 | Fahrzeugzustandsvorhersage .....                            | 50 |
| 4.2.3 | Haptisch-Basierte Unterstützende Steuerungsstrategien ..... | 52 |
| 5     | Nachhaltigkeitsaspekt der Teleoperation .....               | 55 |
| 6     | Chancen der Teleoperation .....                             | 56 |
| 7     | Zusammenfassung .....                                       | 58 |
| 8     | Ausblick .....  | 68 |
|       | Literaturverzeichnis .....                                  | 70 |

# Abbildungsverzeichnis

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Industrielle Revolutionen im Hinblick auf die sich ändernden Segmente ..  | 4  |
| 2  | Kernthemen der Industrie 5.0 .....  | 6  |
| 3  | Stufen des automatisierten Fahrens nach der Klassifikation der SAE .....  | 8  |
| 4  | Begriffsdefinition Teleoperation .....  | 12 |
| 5  | Teleoperationskonzepte in Relation zu den Automatisierungsstufen der SAE .....  | 13 |
| 6  | Teleoperationskonzepte .....  | 13 |
| 7  | Teleoperationskonzepte im Bezug auf die AD-Module .....   | 14 |
| 8  | Direct Control .....  | 15 |
| 9  | Shared Control .....  | 15 |
| 10 | Trajectory Guidance .....   | 16 |
| 11 | Waypoint Guidance .....   | 18 |
| 12 | Interactive Path Planning .....   | 18 |
| 13 | Perception Modification .....   | 19 |
| 14 | Systemarchitektur .....   | 20 |
| 15 | Research Concept Vehicle Model-E .....  | 22 |
| 16 | Benutzerschnittstellen-Konfiguration am Integrated Transport Research Lab des KTH Royal Institute of Technology ..... | 22 |
| 17 | Prototyp der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt .....                       | 23 |
| 18 | Bestandteile der Systemlatenz .....   | 31 |
| 19 | MR-Ansicht über ein HMD .....   | 36 |
| 20 | MR Interface .....  | 37 |
| 21 | HWD mit Kopftracker und Joystick .....  | 38 |
| 22 | Kamerabild mit Zoom-Unschärfe .....   | 39 |
| 23 | Übersicht über das visuelle Feedback .....  | 40 |
| 24 | Steuerungssysteme .....   | 40 |
| 25 | Übersicht über das Lenkkraft-Feedback .....   | 43 |
| 26 | Übersicht über die Motion Cue Control .....   | 45 |
| 27 | Haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden .....  | 47 |
| 28 | Haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden .....  | 48 |
| 29 | Übersicht über die Videovorhersage und -korrektur .....   | 50 |
| 30 | Übersicht über die Fahrzeugzustandsvorhersage .....   | 52 |

## Abkürzungsverzeichnis

|              |   |
|--------------|---|
| <b>AD</b>    | Automated Driving                       |
| <b>ADS</b>   | Automated Driving System                |
| <b>AGS</b>   | Spatial Auditory Guidance System        |
| <b>AR</b>    | Augmented Reality                       |
| <b>AV</b>    | Automated Vehicle                       |
| <b>CAN</b>   | Controller Area Network                 |
| <b>CPPS</b>  | Cyber-physisches Produktionsmodell      |
| <b>DDT</b>   | Dynamic Driving Task                    |
| <b>HF</b>    | Human Factors                           |
| <b>HMD</b>   | Head-Mounted Display                    |
| <b>HWD</b>   | Head-Worn Display                       |
| <b>MPC</b>   | Model predictive control                |
| <b>MR</b>    | Mixed Reality                           |
| <b>ODD</b>   | Operational Design Domain               |
| <b>OOTL</b>  | Out of the Loop Syndrome                |
| <b>SAE</b>   | Society of Automotive Engineers         |
| <b>SbW</b>   | Steer-by-Wire-System                    |
| <b>SCPPS</b> | Sozio-cyberphysisches Produktionssystem |
| <b>SFF</b>   | Steering Force Feedback                 |
| <b>SRPT</b>  | Successive Reference Pose Tracking      |
| <b>StVG</b>  | Straßenverkehrsgesetz                   |
| <b>VR</b>    | Virtual Reality                         |



# 1 Einleitung

In der heutigen Zeit, in der technologische Fortschritte das Tempo der Innovationen bestimmen, stehen autonome Fahrzeuge im Mittelpunkt der Mobilitätsrevolution. Diese Fahrzeuge haben das Potenzial, die Art und Weise, wie wir reisen, grundlegend zu verändern und nehmen im Grad ihrer Autonomie stetig zu. Trotz der beeindruckenden Fortschritte in der Fahrzeugautomatisierung stehen Entwickler und Forscher jedoch vor erheblichen Herausforderungen, die von technischen Einschränkungen bis hin zu unvorhersehbaren Betriebsszenarien reichen.

In diesem Kontext gewinnt die Teleoperation, also die Fernsteuerung von Fahrzeugen, als ergänzende Technologie an Bedeutung, um die bestehenden Grenzen der autonomen Fahrzeugtechnologie zu überwinden. Sie bietet eine flexible Lösung für Situationen, die die derzeitigen automatisierten Systeme überfordern. Durch die Einführung der Teleoperation wird den menschlichen Operatoren ermöglicht, in kritischen Momenten einzugreifen, was die Sicherheit und Zuverlässigkeit dieser Technologien erheblich verbessert.

Dennoch gibt es auch im Rahmen der Teleoperation viele Herausforderungen, insbesondere die Beeinträchtigung des Situationsbewusstseins der Operatoren sowie bestehende Latenzen bei der Signalübertragung. Um diese Problemstellungen zu bewältigen, ist eine menschenzentrierte Gestaltung der Mensch-Maschinen-Schnittstelle, gerade im Sinne der Industrie 5.0, von besonderer Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit untersucht aus diesem Grund die Herausforderungen und Chancen der Teleoperation im Kontext autonomer Straßenfahrzeuge mit besonderem Schwerpunkt auf der Mensch-Maschinen-Interaktion und dem Aspekt der Nachhaltigkeit im Kontext von Industrie 5.0. Dabei ist das Ziel, die Notwendigkeit der Teleoperation infolge der Verbreitung autonomer Systeme zu erörtern und gleichzeitig ein tiefgreifendes Verständnis der technologischen, gesetzlichen und praktischen Herausforderungen der Teleoperation und deren Lösungsansätze zu entwickeln.

Die Arbeit ist wie folgt strukturiert. Den theoretischen Hintergrund dieser Arbeit bildet Kapitel 2. Dieser beinhaltet die spezifischen Herausforderungen und Konflikte, infolge der Implementierung von Industrie 4.0 und die sich daraus ergebenden Ansätze der Industrie 5.0 (Kapitel 2.1). Weiterhin erfolgt eine Definition und Klassifikation des autonomen Fahrens nach der Society of Automotive Engineers (SAE), aus der die Notwendigkeit der Teleoperation ersichtlich wird (Kapitel 2.2). Es folgt eine detaillierte Betrachtung verschiedener Teleoperationskonzepte (Kapitel 2.3 und 2.4) sowie die Darlegung der grundlegenden Systemarchitektur (Kapitel 2.5) und existierender

Anwendungsgebiete von Teleoperationslösungen (Kapitel 2.6). Zusätzlich werden in Kapitel 2.7 die rechtlichen Rahmenbedingungen sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene untersucht.

Der Hauptteil dieser Arbeit setzt sich zum einen aus der Diskussion der Herausforderungen der Teleoperation zusammen (Kapitel 3), in der die zentralen Themen des Situationsbewusstseins und der Latenz adressiert werden. Kapitel 4 bietet Lösungsansätze für eben jene Problemstellungen. Dies umfasst im Kontext des Situationsbewusstseins Visuelles-, Lenkkraft-, Motion Cueing- und Vibrations-/Audio-Feedback sowie die Vorstellung neuartiger Benutzer-Fahrzeug-Schnittstellen in Kapitel 4.1. Analog dazu widmet sich Kapitel 4.2 den Lösungsansätzen der Latenz: der Videovorhersage und -korrektur, der Fahrzeugzustandsvorhersage und den haptisch-basierten unterstützenden Steuerungsstrategien. Weiterhin erfolgt eine Begutachtung des Nachhaltigkeitsaspektes der Teleoperation in Kapitel 5 sowie eine Darlegung der Chancen in Kapitel 6, welche durch die zunehmende Anwendung von Teleoperationslösungen entstehen.

Eine Zusammenfassung der Arbeit bietet Kapitel 7 und ein Ausblick über die in Zukunft relevanten Themen im Hinblick auf die Herausforderungen der Teleoperation wird in Kapitel 8 gegeben.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Um die Herausforderungen und Chancen der Teleoperation in der Logistik tiefgreifend analysieren zu können, erläutert der theoretische Hintergrund dieser Arbeit die relevanten Konzepte und ermöglicht so ein Verständnis von Zusammenhängen. Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit der Geschichte der Industriellen Revolutionen, um dann die spezifischen Herausforderungen und Konflikte der Industrie 4.0 aufzuführen. Anschließend werden die darauf basierenden Ansätze der Industrie 5.0 dargelegt (Kapitel 2.1). Es folgt eine Klassifikation des autonomen Fahrens nach der SAE. Eine kurze Darlegung der bestehenden Herausforderungen des autonomen Fahrens begründet die Notwendigkeit der Teleoperation, die in Kapitel 2.3 definiert wird. Relevante Konzepte der Teleoperation werden in 2.4 vorgestellt und eine Erörterung der grundlegenden Systemarchitektur von Teleoperationssystemen sowie eine beispielhafte Vorstellung existierender Variationen bietet Kapitel 2.5. Zudem werden Anwendungen in öffentlichen als auch in nicht-öffentlichen Bereichen vorgestellt (Kapitel 2.6). Eine Auseinandersetzung mit der Gesetzgebung, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene, findet abschließend in Kapitel 2.7 statt.

### 2.1 Industrie 5.0

Industrie 5.0, auch als die fünfte industrielle Revolution bezeichnet, markiert eine neue Ära der Industrialisierung. Um potentielle Konflikte der Industrie 4.0 zu lösen, arbeiten Menschen eng mit fortschrittlicher Technologie zusammen, um Arbeitsprozesse zu optimieren. Dieser Ansatz geht über die bloße Steigerung von Effizienz und Produktivität hinaus und betont die Bedeutung der Industrie für die Gesellschaft. Im Mittelpunkt steht das Wohlbefinden der Arbeiter, wobei neue Technologien eingesetzt werden, um nicht nur Arbeitsplätze und Wachstum zu fördern, sondern auch den Wohlstand zu steigern und die ökologischen Grenzen des Planeten zu respektieren (European Commission, 2024).

#### 2.1.1 Geschichte der Industriellen Revolutionen

Die bereits vergangenen vier industriellen Revolutionen, welche jeweils durch die Einführung einer oder mehrerer neuer Technologien in die bestehende Industrie verursacht wurden, führten zu grundlegenden Änderungen und damit einhergehenden Produktivitätssprüngen (Bendig et al., 2021). Beginnend mit der Mechanisierung Ende des 18. Jahrhunderts, der Elektrifizierung zu Beginn des 20. Jahrhunderts, der Automatisierung Anfang der 1970er Jahre sind nun, seit Anfang des 21. Jahrhunderts

digitale Technologien der Auslöser für das vierte industrielle Zeitalter (Kagermann et al., 2013).

Die im Jahr 2011 von der deutschen Regierung als neue industrielle Revolution vorgestellte Industrie 4.0, erweitert die Automatisierungstechnologien zu cyber-physischen Systemen (Liao et al., 2017). Basierend auf dem Konzept der „Smart Factory“, soll so die Interaktion zwischen Mensch und Maschine optimiert werden (Lasi et al., 2014). Dahinter stand die Absicht, die Effizienz und Flexibilität der Industrie durch Automatisierungs- und Vernetzungstechnologien zu erhöhen (Becker et al., 2023; Kagermann et al., 2013; Kagermann, 2014).

Die Anwendung neuer Techniken der Informations- und Kommunikationstechnologien innerhalb der vergangenen zehn Jahren, war gekennzeichnet durch tiefgreifende Veränderungen im Bezug auf das Arbeitsleben der Beschäftigten (Parida et al., 2019; Zhou, 2013). Einhergehend mit den Veränderungen auf Technologie- und Alltagsebene, ist eine Dezentralisierung der Arbeitsorganisation zu beobachten. So finden Entscheidungen, zwecks schnellerer Adaption an sich ständig verändernde Umstände, zunehmend auf Arbeiter-Ebene statt. Die Bereitstellung der dafür nötigen Informationen wird durch die Anwendung digitaler Technologien ermöglicht (Molino et al., 2020; L. Wang & Wang, 2016). Ein Überblick der sich verändernden Segmente infolge industrieller Revolutionen bietet Abbildung 1.

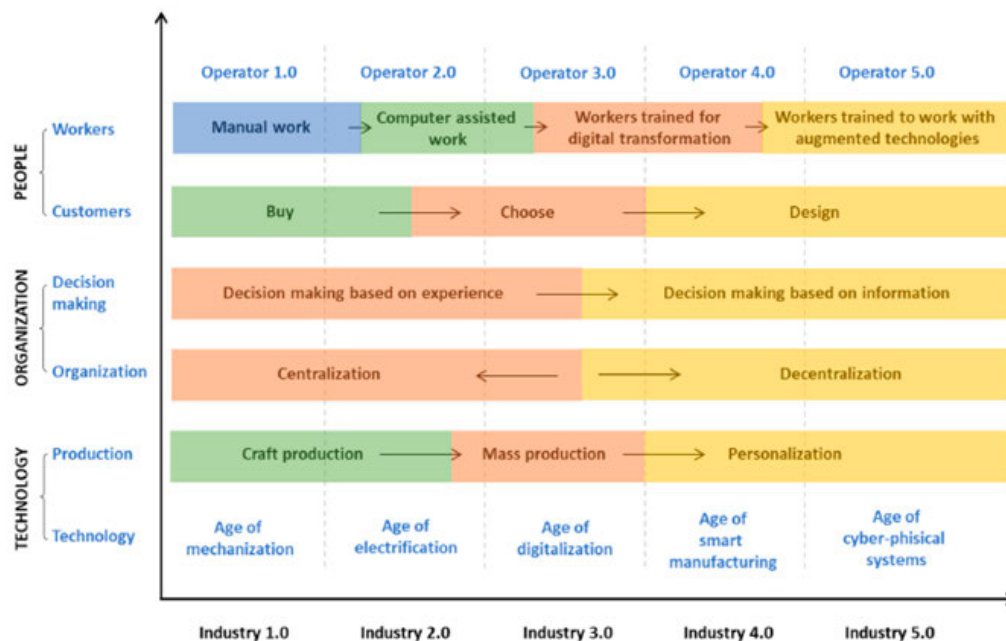


Abbildung 1 Industrielle Revolutionen im Hinblick auf die sich ändernden Segmente (Zizic et al., 2022)

### 2.1.2 Konflikte der Industrie 4.0

Trotz der zunehmenden Anwendung von Automatisierungs- und Vernetzungstechnologien im Rahmen der Industrie 4.0, bleibt der Mensch ein wesentlicher Bestandteil aller Produktionssysteme (Grosse et al., 2023; Kadir et al., 2019). Dabei stellt sich infolge dieser industriellen Revolution die Frage nach der Rolle des Menschen in der Produktion (Rampersad, 2020).

Die bisherige Funktion als Bedienender wird zum einen aufgrund des Fachkräftemangels infolge eines demographischen Wandels und zum anderen der, aufgrund kürzerer Entwicklungszyklen, steigenden physischen bzw. psychischen Belastung in Frage gestellt (Günther et al., 2022). Des weiteren führt die Anwendung von Industrie 4.0-Technologien, besonders bei ungelerntem Personal zu einer eingeschränkten Variabilität in der Entscheidungsfindung und birgt somit das Risiko eines Akzeptanzproblems (Grosse et al., 2023).

Neumann et al. (2021) weist außerdem darauf hin, dass das implizite Versprechen, das die Applikation dieser Technologien eine Erleichterung für die Anwender darstellen, weitgehend von den Perspektiven der Human Factors (HF) abgekoppelt ist. Dabei bezieht sich HF auf die Berücksichtigung menschlicher Bedürfnisse und Fähigkeiten in der Gestaltung von Systemen und Arbeitsumgebungen. Trotz der unbestreitbaren Tatsache, dass die technologischen Entwicklungen der Industrie 4.0 die Rolle der Menschen und deren Arbeitsweise in Produktions- und Logistiksystemen sowie deren Wahrnehmung der Arbeitsumgebung grundlegend verändert haben, wird der Aspekt der menschlichen Faktoren oft vernachlässigt. Die sich aus der Suboptimalität in der Interaktion von Mensch und Maschine ergebende Notwendigkeit einer Veränderung, hin zu einer Anerkennung der zentralen Rolle des Menschen in der Produktion, führt zum Aufkommen der Industrie 5.0 (Günther et al., 2022; Kong et al., 2019).

### 2.1.3 Ansatz der Industrie 5.0

Der Ansatz der Industrie 4.0, welcher darauf abzielt die Effizienz und Produktivität der Industrie zu steigern, ist nicht nachhaltig. Die Publikation der Europäischen Kommission im Januar 2021 „Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry“ (European Commission et al., 2021) fordert dahingehend einen stärker kollaborativen und menschenzentrierten sowie ressourceneffizienteren Ansatz (Xu et al., 2021). Das Hauptaugenmerk soll hierbei auf der Zusammenarbeit der Arbeitenden mit den Maschinen und Robotern, sowie auf der Anpassungsfähigkeit des Fertigungsprozesses und deren Auswirkungen auf die Umwelt sein (Demir et al., 2019; Kong et al., 2019). Dabei sollen im Rahmen der Industrie 5.0 die Technologien

der Industrie 4.0 fortgeführt und optimiert werden, indem bisher weniger beachtete Punkte in den Fokus gerückt werden. So kann die Industrie 5.0 als Ergänzung zur Industrie 4.0 verstanden werden und bricht mit den vorherigen industriellen Revolutionen in dem Sinne, dass diese nicht durch das Aufkommen einer oder mehrerer neuartiger Technologien ausgelöst wurde (Lasi et al., 2014). Die zentralen Treiber der Industrie 5.0 sind die unzureichend adressierten bzw. gelösten Themen der Industrie 4.0: *Menschenzentrierung*, *Resilienz* und *Nachhaltigkeit* (Ivanov, 2023).

Der menschenzentrierte Ansatz der Industrie 5.0 richtet den Fokus auf die Bedürfnisse des Menschen während des Produktionsprozesses und untersucht, inwieweit eine Technologie den Arbeitenden unterstützen kann (Zizic et al., 2022). Die Interaktion mit menschlichen Arbeitskräften wird dabei mit in den Entwicklungsprozess der Automatisierungssysteme einbezogen. So dient die Integration von Technologien wie der künstlichen Intelligenz, Robotik oder dem Internet der Dinge der Steigerung von Effizienz und Flexibilität (Karacan et al., 2022). Weiterhin wird eine agile Fertigungsumgebung zur Adaption an sich verändernde Marktanforderungen geschaffen. Dabei nimmt die Arbeitsaufteilung eine zentraler Position ein. Sich wiederholende, ermüdende Aufgaben übernimmt die Robotik; den Stärken des Menschen entsprechende Problemstellungen werden weiterhin von Menschen gelöst (Parasuraman et al., 2000).

Die Optimierung der Energie- und Ressourceneffizienz sowie die Verwendung erneuerbarer Energien beschreibt den Nachhaltigkeitsaspekt der Industrie 5.0 (Becker et al., 2023). Resilienz hingegen bezieht sich auf die Widerstandsfähigkeit der Produktion und Lieferketten gegen disruptive Ereignisse durch adaptive Prozesse (Becker et al., 2023; Zizic et al., 2022). Eine Übersicht über die zentralen Treiber der Industrie 5.0 bietet Abbildung 2.

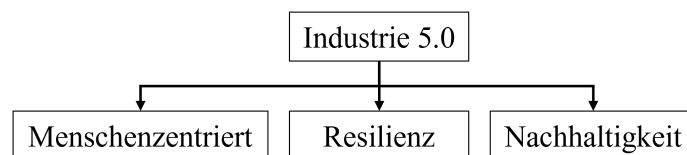


Abbildung 2 Kernthemen der Industrie 5.0

Einen expliziten Ansatz für das Modell der Industrie 5.0 formulieren dabei Günther et al. (2022). Demnach soll das in der Industrie 4.0 etablierte Model sozio-technischer Systeme, das cyber-physische Produktionsmodell CPPS, um eine sozio-technische Komponente ergänzt werden, sodass das sozio-cyberphysische Produktionssystem SCPPS entsteht. Während das CPPS die Integration von physischen und virtuellen Komponenten in der Produktion betont, erweitert das SCPPS dieses Konzept um die Einbindung sozialer und gesellschaftlicher Aspekte in die Produktionsumgebung. Günther et al. (2022) definieren das SCPPS als ein Produktionsumfeld, das

nicht nur auf die technologischen Aspekte fokussiert ist, sondern auch die sozialen und gesellschaftlichen Dimensionen der Produktion berücksichtigt. Dazu zählen die Auswirkungen auf die Arbeitskräfte, die Interaktion mit den Verbrauchern und die gesellschaftlichen Auswirkungen der Produktion. Hierbei können die Bioparameter des Menschen, bspw. EKG-Werte oder Emotionen, als erweiterte Entität in das CPPS integriert werden und zur aktiven Regulierung verwendet werden. Dadurch wird eine subjektorientierte Steuerung ermöglicht. Da das Cyber-System dabei nur indirekt auf das sozio-kognitive System einwirken kann, muss sich das System infolgedessen an dessen Reaktion anpassen. Dies bedeutet, dass das SCPPS nicht nur auf die Effizienz und Flexibilität der Produktion abzielt, sondern auch, im Rahmen der Industrie 5.0, auf die Schaffung einer nachhaltigen und sozial verantwortlichen Produktionsumgebung (Günther et al., 2022).

So kommt es auch bei der Umsetzung der Industrie 5.0 zu diversen Herausforderungen. Es stellt sich die Frage, welche Technologien der Industrie 4.0, aus technologischer Sicht als auch aus organisatorischer Sicht, in das bestehende Produktionssystem eingebunden werden sollten. Dabei sind Investitionskosten, Wissen als auch die Notwendigkeit einer Applikation wichtige Faktoren, die die Entscheidung beeinflussen (Haseeb et al., 2019; Hu, 2013). Ebenso ist die Akzeptanz seitens der Mitarbeiter hinsichtlich einer Veränderung infolge neuer Technologien entscheidend zu Beurteilung der resultierenden Effektivität (Bai et al., 2020; Schumacher et al., 2016). Eine menschenzentrierte Herangehensweise im Sinne der Industrie 5.0 ist hier entscheidend, um negative Auswirkungen auf die Mitarbeitenden infolge suboptimaler Systeme zu vermeiden (Kadir et al., 2019; Neumann et al., 2021). So beschreibt die Berücksichtigung menschlicher Bedürfnisse bei der Einführung von Technologien der Industrie 4.0 das zentrale Element der Industrie 5.0 und führt so zu leistungsfähigeren Systemen (Grosse et al., 2023).

## **2.2 Autonomes Fahren**

Autonomes Fahren beschreibt die Fähigkeit eines Fahrzeugs, sich selbstständig und ohne menschliches Eingreifen fortzubewegen. Fahrzeuge mit dieser Fähigkeit sind mit einer Vielzahl von Sensoren, Kameras, Radarsystemen und fortschrittlichen Algorithmen ausgestattet, die es ihnen ermöglichen, ihre Umgebung zu erkennen, zu interpretieren und darauf zu reagieren, um sicher und effizient zu navigieren (Queck et al., 2022).

Eine formale Definition des autonomen Fahrens wird durch die Klassifikationen der Society of Automotive Engineers (SAE) ermöglicht (bekannt als SAE J3016), die die

verschiedenen Stufen der Automatisierung von Fahrzeugen beschreibt (SAE J3016, 2021).

### 2.2.1 Stufen der Automatisierung der SAE

Die Abstufungen der SAE J3016 (2021) reichen von „gänzlich nicht automatisiertem Fahren“ (Stufe 0) zu „vollautomatisierten Systemen“ (Stufe 5) und beschreiben somit den Grad, inwieweit ein Eingreifen durch den menschlichen Bediener erforderlich ist. So wird insbesondere bei den höheren Stufen dieser Klassifikation (Level 3 bis Level 5) von autonomem Fahren gesprochen. Eine Übersicht der Abstufungen des automatisierten Fahrens der SAE bietet Abbildung 3.

| Operator fährt das Fahrzeug |                                    |                               | Automatisiertes System (wenn aktiv) fährt das Fahrzeug |  |                                |   |
|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|--|--------------------------------|---|
|                             | Stufe 0                            | Stufe 1                       | Stufe 2  | Stufe 3  | Stufe 4                        | Stufe 5   |
|                             | keine Automatisierung              | Fahrer-Assistenz              | Teilautomatisierung                                    | Bedingt automatisiert  | Hohe Automatisierung           | Vollautomatisierung                                 |
| Fahrer                      | Fahrer übernimmt alle Fahraufgaben | Manuelle Fahrzeugkontrolle    | Aktive Überwachung                                     | Fahrer wird angefordert  | Fahrer wird angefordert        | Keine Fahrer erforderlich                           |
| Fahrzeug                    | Reagiert auf Fahrbefehle           | Einfache Fahrassistenzsysteme | Übernimmt situationsbedingt Längs- und Querführung     | Übernimmt vollständige Längs- und Querführung unter bestimmten Bedingungen | Übernimmt situativ Fahraufgabe | Übernimmt alle Fahraufgaben in sämtlichen Szenarios |

Abbildung 3 Stufen des automatisierten Fahrens nach der Klassifikation der SAE in Anlehnung an Lu et al. (2022) und Queck et al. (2022)

Bei Fahrzeugen ohne Automatisierung (Stufe 0) führt der Mensch alle Steuerungsaufgaben selbst aus. Warnungen und momentane Eingriffe durch Assistenzsysteme, wie zum Beispiel Notbremsassistenten sind möglich – die Fahraufgabe bleibt dennoch vollständig dem menschlichen Fahrer vorbehalten.

Fahrzeuge, die in der Lage sind, die Längs- oder Querführung zu übernehmen und somit dem Fahrer assistieren, repräsentieren Stufe 1 des Automatisierungsgrades. Adaptive Tempomaten, die die Geschwindigkeit des Fahrzeugs anpassen sind beispielhaft für die Stufe. Dennoch muss der Fahrer jederzeit bereit sein, die Kontrolle zu übernehmen.

Sobald ein System in der Lage ist sowohl Längs- als auch Querführung zu übernehmen, spricht man von einer Teilautomatisierung (Stufe 2). Auch hier muss der Fahrer jederzeit bereit sein einzugreifen.

Stufe 3 (bedingt automatisierte Systeme) beschreibt Fahrzeuge, die unter bestimmten Bedingungen und Umgebungen im Stande sind die Kontrolle über alle kritischen Fahrfunktionen zu übernehmen und somit selbstständig zu fahren. Der Fahrende



muss jedoch stets bereit sein, auf Anforderung des Systems wieder die Kontrolle zu übernehmen.

Im Gegensatz dazu kann ein Fahrzeug der Stufe 4 (hohe Automatisierung) in den vorgesehenen Betriebsbereichen und -bedingungen vollständig autonom fahren, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist. Der Grad an Autonomie ist daher gestiegen.

Ist die Übernahme der Fahrfunktionen unabhängig von den Umgebungen und Bedingungen möglich, spricht man von der fünften Stufe - einem vollautomatisierten System.

### 2.2.2 Notwendigkeit der Teleoperation

Ein automatisiertes Fahrsystem (im Englischen Automated Driving System, kurz ADS) bildet die Grundlage, eine spezifische und kontinuierliche dynamische Fahraufgabe (im Englischen Dynamic Driving Task, kurz DDT) eigenständig auszuführen. Um eine Fahraufgabe zu absolvieren, ist die Implementierung verschiedener ADS-Funktionen nötig. Jede ADS-Funktion besitzt dabei eine Nutzungsspezifikation, die ihren Automatisierungsgrad und den vorgesehenen zulässigen Betriebsbereich (im Englischen Operational Design Domain, kurz ODD) festlegt. Damit hängt die beherrschbare ODD eines Fahrzeugs von der Hardware, den implementierten Fahrfunktionen sowie der Infrastruktur ab (Queck et al. 2022).

Die SAE J3016 definiert die ODD als »*Betriebsbedingungen, unter denen ein gegebenes, speziell dafür ausgelegtes Automatisierungssystem oder -element funktioniert, insbesondere umweltbedingte, geografische und tageszeit bedingte Beschränkungen und/oder das erforderliche Vorhandensein oder Fehlen von bestimmten Verkehrs- oder Straßencharakteristika*« (übersetzt aus SAE J3016, 2021, S.17). So gewährleistet der zulässige Betriebsbereich (ODD), unter welchen Bedingungen ein automatisiertes Fahrzeugsystem (ADS) eigenständig eine dynamische Fahraufgabe (DDT) absolvieren kann, so dass die Sicherheit des autonomen Fahrzeugs, während der Fahraufgabe, garantiert ist.

Liegt die ADS-Funktion außerhalb der ODD, ist dessen Sicherheit nicht mehr gewährleistet und führt daher zu einem ODD-Exit-Ereignis, d.h. je nach Automatisierungsstufe werden geeignete Schritte eingeleitet, um das Fahrzeug wieder in die spezifische ODD zurückzuführen. Bis zur Automatisierungsstufe 3 ist ein Eingriff des Fahrers als Rückfallebene möglich (Salvi, Aniket, 2022). Beim autonomen Fahren der Stufe 4 oder Stufe 5, bei denen kein Fahrer im Fahrzeug anwesend sein muss, müssen die Fahrzeuge gemäß der SAE J3016 (2021) einen Zustand minimalen Risikos erreichen,

bevor sie ihr automatisiertes Fahrsystem abschalten. In diesem Zustand des minimalen Risikos (in der Regel in Form eines Stillstandes), kann das Fahrzeug seine Mission nicht von selbst fortsetzen (Brecht et al., 2024).

Um jedoch ein vollständig automatisiertes System zu realisieren, das in der Lage ist, sämtliche Fahrsituationen sicher zu meistern, müssen noch zahlreiche technische und operationelle Herausforderungen bewältigt werden.

### **2.2.3 Herausforderungen des Autonomen Fahrens**

Auch wenn die Entwicklung und der Einsatz von (teil)automatisierten Fahrzeugen in den letzten Jahren stark zugenommen hat und die Nachfrage voraussichtlich ebenfalls weiter ansteigen wird (Next Move Startegy Consulting, 2023), gibt es noch diverse Herausforderungen die für vollständig automatisierte Systeme gemeistert werden müssen. So stellt die Indeterminiertheit, also die Unvorhersehbarkeit von Wetterverhältnissen bis hin zu menschlichem Verhalten, eine große Schwierigkeit für die Entwicklung dar (Yurtsever et al., 2020). Das führt, wie ein Bericht der National Highway Traffic Safety Administration zeigt, zu einer hohen Beteiligung von teilautonomen Fahrzeugen an Unfällen (Kroman, 2022).

Auch sind derzeitige teilautonome Fahrzeuge in ihren Fähigkeiten auf bestimmte Situationen beschränkt. Beispiele hierfür sind Funktionen wie das eigenständige Parken oder Stauassistenten auf Autobahnen (Yu et al., 2019). Werden diese Fahrzeuge außerhalb ihres spezifizierten Einsatzgebietes verwendet, resultiert dies in Fehlern bei der Wahrnehmung der Umgebung des Fahrzeugs und in Uneindeutigkeiten bei der Entscheidungsfindung (Q. Zhang et al., 2021).

Der Grund für diese Herausforderungen liegt in der Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit autonomer Fahrzeuge von maschinellen Lernmodellen, welche auf spezifischen Datensätzen basieren. Daher kommt es in herausfordernden Umgebungssituationen (extreme Lichtverhältnisse, Starkregen) zum Leistungsabfall (Lu et al., 2022).

In diesem Zusammenhang stellt die Teleoperation, als Fernunterstützung eines autonomen Fahrzeugs, eine vielversprechende Zwischenlösung dar, um bereits jetzt das Potenzial autonomen Fahrens voll auszuschöpfen und dabei eine zufriedenstellende Sicherheit zu gewährleisten.

## **2.3 Definition der Teleoperation**

Die Teleoperation ergänzt autonome Fahrsysteme durch die Integration menschlicher Intelligenz, so dass bestehende Herausforderungen bei der Umgebungswahrnehmung

und -erkennung unter komplexen Bedingungen bewältigt werden können. Die Strategie besteht dabei in der Umwandlung unbekannter Situationen in bekannte, für das autonome System zu bewältigende, Fahrsituationen (Lu et al., 2022). Die Etymologie des Begriffs „Teleoperation“ setzt sich aus dem griechischen Wort „tele-“ (fern, weit) und dem lateinischen Wort „operare“ (arbeiten) zusammen. Das entspricht sinngemäß dem Arbeiten aus der Ferne (Queck et al., 2022). Dahingehend dient der Begriff der Teleoperation, im Kontext des autonomen Fahrens, als Oberbegriff für alle Funktionen, die zur Fernunterstützung des Betriebs automatisierter Fahrzeuge notwendig sind (Majstorovic et al., 2022).

Aufgaben der Teleoperation lassen sich in zwei Kategorien einteilen: fahrbezogene und missionsbezogene Aufgaben (Brecht et al., 2024). Fahrbezogene Teleoperationsaufgaben umfassen alle Tätigkeiten, die erforderlich sind, um ein Fahrzeug auf öffentlichen Straßen zu manövrieren. Diese beinhalten direkte Interaktionen mit oder dem Ersatz von Funktionen des automatisierten Fahrens, die Teil der dynamischen Fahraufgabe sind. Missionsbezogene Teleoperationsaufgaben hingegen beschreiben zusätzliche Aufgaben, die für eine erfolgreiche Missionserfüllung notwendig sind. Dazu gehört bspw. die Kommunikation mit den Fahrgästen im Fahrzeug oder die Anpassung der Klimatisierung (Brecht et al., 2024). In dieser Arbeit geht es ausschließlich um fahrbezogene Teleoperationsaufgaben.

Mit zunehmender Aktivität im Bereich der Teleoperation wurden unterschiedliche Begriffsdefinitionen für ähnliche oder sogar identische Teleoperationstechniken verwendet. Bogdoll et al. (2021) geben einen umfassenden Überblick über die im Automobilbereich verwendete Terminologie. Eine adaptierte Taxonomie, welche sich an der Taxonomy von Bogdoll et al. (2021), sowie der SAE J3016 (2021) und den Leitlinien für automatisierte Fahrzeuge Institution (2022) orientiert, bieten Majstorovic et al. (2022). Majstorovic’s Einordnung von Begriffen wird, aufgrund ihrer Einheitlichkeit, als Grundlage für diese Arbeit verwendet. Demnach kann die Teleoperation, in Anbetracht des Grades der menschlichen Intervention bei der Steuerung der DDT während der Teleoperation, auf zwei verschiedene Weisen erfolgen: durch direkte Steuerung (im Englischen Remote Driving) und indirekte Steuerung (im Englischen Remote Assistance) (Brecht et al., 2024; Gnatzig, 2015; Majstorovic et al., 2022).

Beim Remote Driving ist das System unter voller Kontrolle des Teleoperationsbedieners (Majstorovic et al., 2022). Er übernimmt in Echtzeit über einen längeren Zeitraum gänzlich die Fahraufgabe infolge direkter, niederrangiger Steuereingaben wie Lenkradwinkel- und Geschwindigkeitsbefehle (Gnatzig, 2015; Lu et al., 2022). Da der Mensch weiterhin das Fahrzeug kontrolliert, agieren diese teleoperierten Fahrzeuge nicht vollständig autonom. Diese Form der Teleoperation hat häufig die Funktion,

| <b>Begriff</b> |                   | <b>Beschreibung</b>  |
|----------------|-------------------|--|
| Teleoperation  | Remote Driving    | System erhält direkte Steuerbefehle.                                   |
|                | Remote Assistance | System erhält „High-Level-Anweisungen“.                                |
|                | Remote Monitoring | System wird überwacht mit stark begrenzten Interventionsmöglichkeiten. |

Abbildung 4 Begriffsdefinition Teleoperation in Anlehnung an Majstorovic et al. 2022

die Kontrolle über das Fahrzeug in komplexen, für das autonome System nicht zu bewältigenden Umgebungssituationen, zu übernehmen (Lu et al., 2022).

Remote Assistance beschreibt wiederum ein Konzept, bei dem lediglich „High-Level-Anweisungen“ gegeben werden, die bestimmte Funktionen des automatisierten Fahrens ansprechen. So gesehen erfolgt hierbei eine Beratung des autonomen Systems auf Wahrnehmungs- oder Planungsebene (Majstorovic et al., 2022). Dabei wird dem Operator entweder eine Reihe von Handlungsoptionen zur Verfügung gestellt, aus denen dieser dann auswählen kann. Oder aber der Operator wird direkt in den Auswahlprozess miteinbezogen, etwa durch die Kartierung einer neuen Route oder der Beantwortung spezifischer Fragen. Das autonome System behält hierbei die Fahraufgabe jedoch selbstständig bei (Lu et al., 2022).

Unter dem Begriff der Teleoperation wird häufig auch das Konzept des Remote Monitoring erwähnt. Da diese Form der Teleoperation sich jedoch hauptsächlich auf die Überwachung des autonomen Systems bezieht und nur begrenzte Möglichkeiten der Intervention bietet (Majstorovic et al., 2022), wird sie im Folgenden nicht näher betrachtet.

Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die vorgestellten Konzepte der Teleoperation anhand der Taxonomie von Majstorovic et al. (2022). Eine nähere Erläuterung der unterschiedlichen Arten des Remote Driving und der Remote Assistance bietet Kapitel 2.4.

Nach Amador et al. (2022) ist das Remote Driving üblich bei Fahrzeugen der SAE-Stufe 0 bis 2. Die Hauptverantwortung liegt hierbei nach wie vor beim Operator, welcher jederzeit anwesend sein muss. Ab der dritten Stufe der Fahrzeugautomatisierung trägt das autonome System die Verantwortung während der gesamten dynamischen Fahraufgabe, es sei denn der Operator muss im Sinne der Rückfallebene eingreifen. Bei den Automatisierungsstufen 4 und 5 wird in der Regel das Konzept der Remote Assistance angewendet. Ein Eingreifen im Sinne des Remote Drivings in

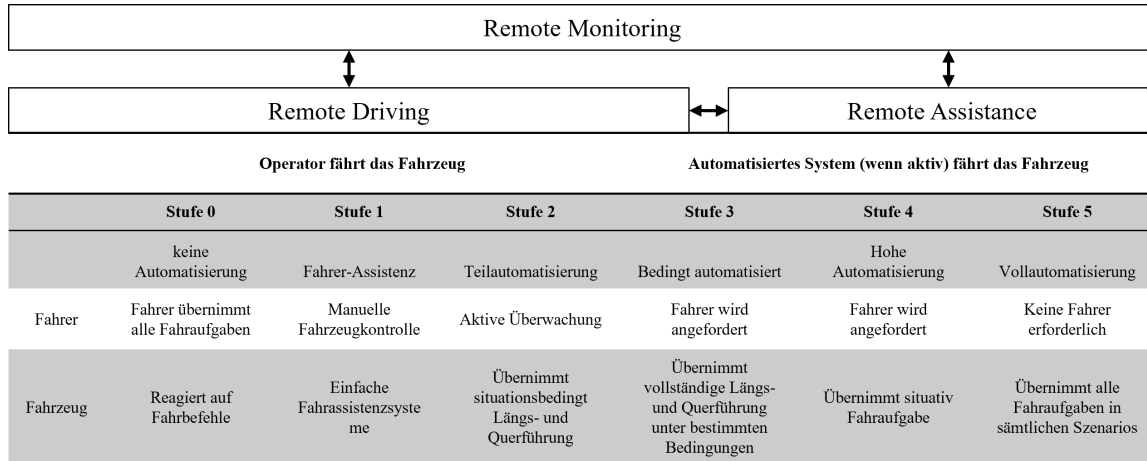


Abbildung 5 Teleoperationskonzepte in Relation zu den Automatisierungsstufen der SAE in Anlehnung an Lu et al. (2022) und Queck et al. (2022)

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Remote Driving      | Remote Assistance         |
| Direct Control      | Waypoint Guidance         |
| Shared Control      | Interactive Path Planning |
| Trajectory Guidance | Perception Modifikation   |

Abbildung 6 Teleoperationskonzepte in Anlehnung an Majstorovic et al. (2022)

Ausnahmesituationen ist möglich. Da der Operator beim Remote Monitoring keinen direkten Einfluss auf das autonome System nimmt, entzieht sich dieses Konzept einer Zuordnung. Ein Wechsel im Bedarfsfall zu einem der beiden Steuerungskonzepte ist dennoch möglich. Eine Darstellung der Teleoperationskonzepte in Relation zu den Automatisierungsstufen der SAE bietet Abbildung 5.

## 2.4 Konzepte der Teleoperation

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, lassen sich die Teleoperationskonzepte in zwei Kategorien einteilen – dem Remote Driving und der Remote Assistance (Brecht et al., 2024). Diese Kategorien beinhalten jeweils drei Teleoperationskonzepte. Zu der Kategorie des Remote Driving zählen Direct Control, Shared Control und Trajectory Guidance. Unter dem Begriff Remote Assistance werden die Konzepte Waypoint Guidance, Interactive Path Planning und Perception Modifikation zusammengefasst (Majstorovic et al., 2022). Abbildung 6 bietet einen Überblick. Im Folgenden werden diese Konzepte im Einzelnen dargestellt und erläutert.

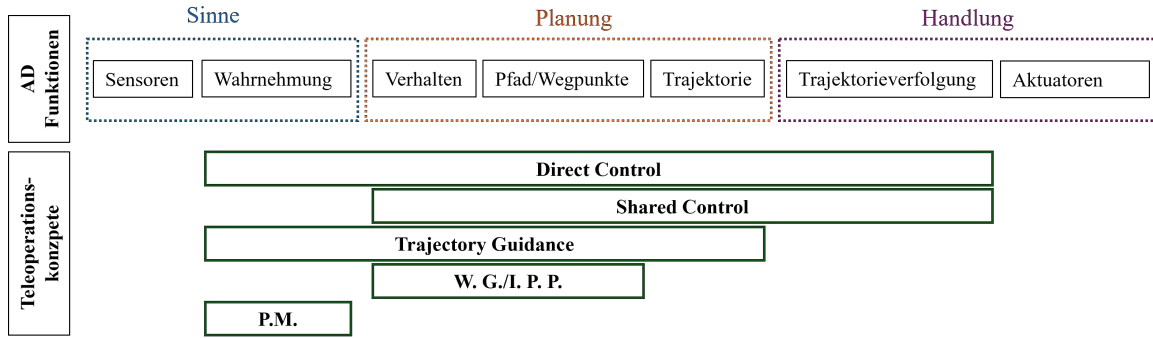


Abbildung 7 Teleoperationskonzepte im Bezug auf die AD-Module in Anlehnung an Majstorovic et al. (2022)

In Abbildung 7 wird der Grad der Intervention der verschiedenen Teleoperationskonzepte mit den jeweiligen autonomen Fahrfunktionen (AD-Module) verdeutlicht. Der obere Teil der Abbildung stellt die vereinfachten Module eines AD-Systems dar, während der untere Bereich die Teleoperationskonzepte und deren Eingriffsbereich zeigt. Diese Abfolge der Funktionen umfasst die Module: (1) SENSE, bestehend aus Sensoren und Wahrnehmungsalgorithmen, (2) PLAN von Verhalten, Route/Wegpunkten und anschließender Trajektorie, und (3) ACT, welches die Trajektorienverfolgung und die Fahrzeugaktuatoren beinhaltet (Majstorovic et al., 2022).

#### 2.4.1 Direct Control

Direct Control (siehe Abbildung 8) als eine Art der Fernsteuerung stellt die grundlegendste Form der Teleoperationskonzepte dar. Der Teleoperator steuert das Fahrzeug, über ein Lenkrad und die Pedalerie direkt, indem er, auf Basis von verfügbaren Umgebungsdaten, wie Videoströme und andere Sensordaten, gewünschte Geschwindigkeits- und Lenkbefehle gibt (Majstorovic et al., 2022). Während dieses Konzept eine effiziente Art der Fernsteuerung bietet, wird das Situationsbewusstsein des Operators, aufgrund der hohen kognitiven Arbeitsbelastung infolge der direkten Fahrzeugsteuerung, stark beeinträchtigt (Mutzenich et al., 2021). Des Weiteren besteht eine deutliche Abhängigkeit zur Stabilität des Mobilfunknetzes (Hoffmann & Diermeyer, 2021) sowie zu weiteren Netzwerkproblemen wie Latenzzeiten oder Datenübertragungsverlusten (Georg, Putz & Diermeyer, 2020).

#### 2.4.2 Shared Control

Shared Control (siehe Abbildung 9) als Teleoperationskonzept wurde entwickelt, um die Unzulänglichkeiten des Konzepts der direkten Kontrolle (Direct Control) auszugleichen. So kann es als erweitertes Konzept mit zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen verstanden werden (Schitz, Graf et al., 2021b). Das Hauptziel besteht darin, den



Abbildung 8 Direct Control (Majstorovic et al., 2022)

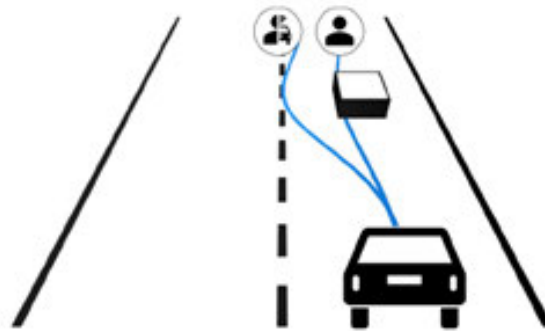


Abbildung 9 Shared Control (Majstorovic et al., 2022)

Fahrer in Echtzeit zu unterstützen und dadurch die Sicherheit des ferngesteuerten Fahrzeugs als auch die der anderen Verkehrsteilnehmer, zu verbessern. Ähnlich wie bei der direkten Steuerung umfasst die Schnittstelle für den menschlichen Bediener ein Lenkrad sowie Gas- und Bremspedale zur Steuerung der Quer- und Längsbewegung. Die Eingaben des Fahrers werden dabei hinsichtlich verschiedener Sicherheitsziele, wie etwa der Kollisionsvermeidung oder eines Abweichens von der Fahrbahn bewertet und ggf., sofern die Eingaben des Fahrers diese Ziele nicht erfüllen, von der Fahrzeugsteuerung übersteuert und durch eine Reihe sicherer Befehle angepasst (Schimpe et al., 2022).

Obwohl diese gemischte Steuerungsstrategie aufgrund des erhöhten Sicherheitspotenzials vorteilhaft ist, kann sie eine zusätzliche Arbeitsbelastung für den Bediener darstellen, da dieser die zusätzlichen Interaktionen mit dem automatisierten Fahrsystem verstehen muss. Dies stellt neue Anforderungen an die Gestaltung der Benutzerschnittstelle, da diese zusätzlichen Information übermittelt werden müssen, ohne die kognitive Belastung stark zu erhöhen (Yun et al., 2023).

### 2.4.3 Trajectory Guidance

Bei dem Konzept der Trajectory Guidance (siehe Abbildung 10) wird die direkte Steuerung vom Fahrzeug ausgeführt. Der Bediener übernimmt hierbei lediglich die

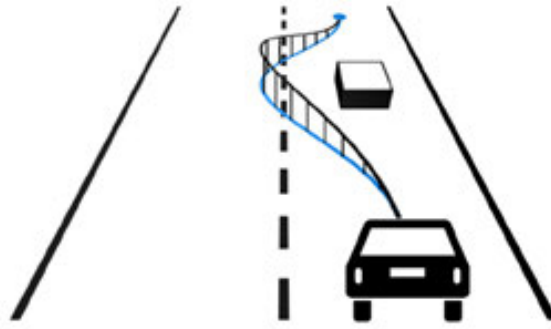


Abbildung 10 Trajectory Guidance (Majstorovic et al., 2022)

Aufgaben der Wahrnehmung und Planung, indem dessen Steuerbefehle als Trajektorien ausgegeben werden, die aus einem Pfad und einem entsprechenden Geschwindigkeitsprofil bestehen. Diese Trajektorien werden dann vom Fahrzeug verfolgt. Dadurch wird der Bediener von latenzkritischen Steuerungsaufgaben entlastet. Da die gleiche Schnittstelle wie im Trajektorienplanungsmodul des AD-Moduls verwendet wird, kann die Ferntrajektorienführung leicht in den Automated Vehicle (AV)-Module integriert werden (Majstorovic et al., 2022).

Einen Ansatz zur diskreten Trajektorienführung implementierten Gnatzig et al. (2012), bei dem der Fahrer mit einem Joystick oder Lenkrad erzeugte Bahnsegmente von mehreren Metern vorgibt. Dieses Konzept ist dadurch charakterisiert, dass das Fahrzeug anhält sobald keine weiterführenden Bahnsegmente mehr vorhanden sind. Der höhere Grad an Entkopplung des Bedieners von der Fahrzeugsteuerung, erlaubt dagegen keine dynamische Anpassung des aktuellen Fahrzeugverhaltens.

Hoffmann et al. (2022) schlugen ein Konzept vor, welches sich dadurch charakterisiert, dass die über Lenkrad und Pedale gegebenen Steuerbefehle in eine gewünschte Trajektorie umgesetzt wird, die im Stillstand endet. Dadurch wird im Gegensatz zur kontinuierlichen Trajektorienverfolgung des Grundkonzeptes eine dynamische Anpassung des gewünschten Fahrzeugverhaltens ermöglicht. Dies führt wiederum zu einer Reduzierung der Entkopplung zwischen menschlicher Bedienung und Fahrzeugsteuerung, da der Fahrer die gewünschte Trajektorie mit höheren Frequenzen planen muss.

Thorpe und Thorpe (1995) entwickelten ein Konzept, das es dem Bediener ermöglicht eine Wegpunktsequenz zu erstellen, bestehend aus diskreten Wegpunkten und den gewünschten Geschwindigkeiten. Eine Interpolation dieser Wegpunkte führt dann zu einer strikt zu verfolgenden Bahn für das Fahrzeug. Dieser hohe Grad an Entkopplung kann zu einer Erhöhung der Gesamtinteraktionszeit führen, was sich möglicherweise auf die Arbeitsbelastung des Bedieners auswirkt (Brecht et al., 2024).



#### 2.4.4 Waypoint Guidance

Das Konzept des Waypoint Guidance (siehe Abbildung 11) ist eng mit dem Konzept des Trajectory Guidance verwandt, unterscheidet sich jedoch dadurch, dass die endgültige Entscheidung über die Trajektorie durch das Autonome Fahrzeug gefällt wird. Wie schon beim vorherigen Konzept liegt auch hier die Aufgabe des Bedieners in der Entscheidungsfindung und der Pfadplanung, welche durch die Spezifikation diskreter Wegpunkte auf einem Kamerabild oder einer Landkarte erfolgt. Der sich daraus ergebende Pfad wird von dem Fahrzeug verfolgt, sodass die direkte Steuerung nach wie vor auf Seiten des Fahrzeugs liegt. Dabei wird die erfasste Fahrzeugumgebung in die letztendliche Pfadfindung miteinbezogen, sodass sich der final ausgewählte Weg von den vorgegebenen Wegpunkten durchaus unterscheiden kann (Schitz, Bao et al., 2021). Dies bedeutet auch, dass nur ein begrenzter dynamischer Eingriff durch den Bediener möglich ist, was zu einem zeitineffizienten Stop-and-Go-Fahrverhalten führen kann und möglicherweise die Gesamtinteraktionszeit erhöht (Brecht et al., 2024).

Der Vorteil dieses Konzepts begründet sich auch hier, aufgrund des hohen Grades der Entkopplung zwischen Bedieneraufgaben und Fahrzeugsteuerung, in der Robustheit gegenüber Netzwerklatenzproblemen (Majstorovic et al., 2022). Des Weiteren ermöglicht dieses Konzept, aufgrund der Unterstützung des Fahrzeugs auf Planungsebene, Aufgaben effizient und mit geringerer Arbeitsbelastung zu lösen (Brecht et al., 2024).

Variationen ergeben sich durch die unterschiedliche Art und Weise Wegpunkte zu erstellen. Björnberg (2020) stellte ein Konzept vor, indem er ein simuliertes Fahrzeug in einer virtuellen Umgebung steuerte, dessen aufgezeichneten Wegpunkten das reale Fahrzeug dann folgte.

Der Ansatz von Schitz, Graf et al. (2021a) beschreibt die Erstellung eines Korridors entlang der mit der Maus angeklickten Wegpunkte, innerhalb dessen das Fahrzeug eine automatische Trajektorienplanung durchführt.

#### 2.4.5 Interactive Path Planning

Das Prinzip der interaktiven Pfadplanung (siehe Abbildung 12) wurde von Hosseini et al. (2014) eingeführt und ermöglicht eine Echtzeit-Interaktion zwischen Mensch und Maschine auf der Ebene der Pfadplanung. Schitz, Bao et al. (2021) entwickelten dieses Konzept weiter. Sie ermöglichten dem Operator, in die Entscheidungsebene des autonomen Fahrzeuges einzugreifen. Dabei werden verschiedene Informationen aus den Modulen eines autonomen Fahrzeugs wie Wahrnehmung, Trajektorienplanung und Trajektorienverfolgung kombiniert, um eine optimierte Pfadplanung und -anpassung unter Berücksichtigung der dynamischen Umgebungsbedingungen zu ge-

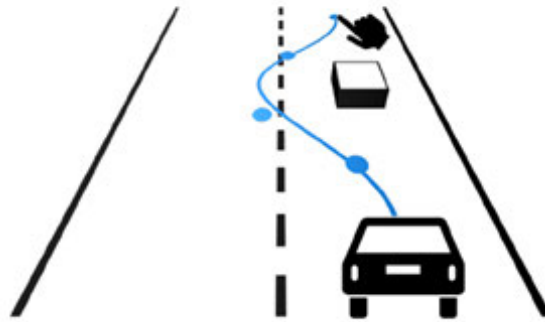


Abbildung 11 Waypoint Guidance (Majstorovic et al., 2022)

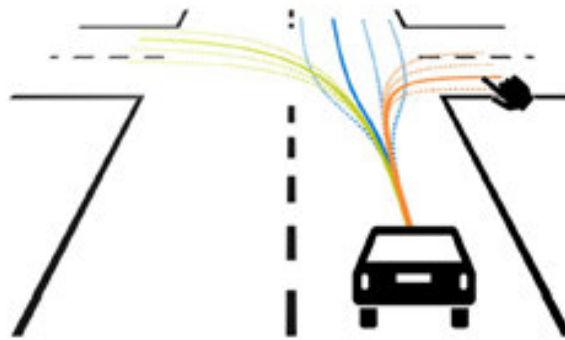


Abbildung 12 Interactive Path Planning (Majstorovic et al., 2022)

währleisten. Aus den, mittels Augmented Reality visualisieren angebotenen Pfaden, kann der menschliche Bediener wählen. Indem die Verantwortung des Bedieners, durch die Übernahme komplexer Steuerungsaufgaben durch das autonome System weiter reduziert wird, verringert sich die kognitive Belastung des Bedieners, welches zu einer signifikanten Verbesserung gegenüber dem Teleoperationskonzept des Waypoint Guidance (vgl. Kapitel 2.4.4) darstellt.

Majstorovic und Diermeyer (2023) boten eine Implementierung an, die die vollständige Integration in die verschiedenen AV-Module unterstützt und das Gesamtkonzept um die Idee der ODD-Modifikation erweitert. Die Idee der ODD-Modifikation bezieht sich auf die dynamische Erweiterung bzw. Anpassung der ODD-Bedingungen, so dass die Leistung und Anpassungsfähigkeit des Fahrzeugs verbessert wird. Das resultiert möglicherweise in einer Steigerung der Effizienz und des Situationsbewusstseins des Bedieners und trägt dazu bei, die Arbeitsbelastung zu reduzieren.

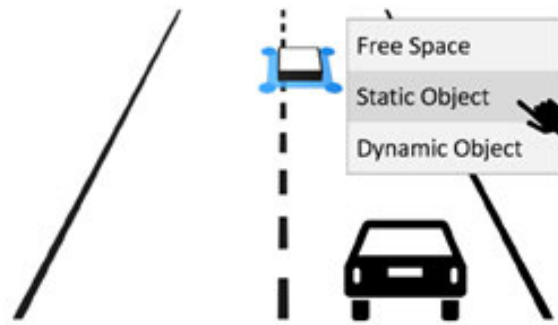


Abbildung 13 Perception Modification (Majstorovic et al., 2022)

#### 2.4.6 Perception Modification

Das Teleoperationskonzept der Perception Modification (siehe Abbildung 13) ist ein Ansatz zur Unterstützung des Wahrnehmungsmoduls in autonomen Fahrzeugen. Dabei wird dieses nicht ersetzt, sondern durch die menschliche Wahrnehmung ergänzt, um die Zuverlässigkeit der autonomen Fahrfunktionen zu erhöhen und die Gesamtarbeitsbelastung des Bedieners zu reduzieren (Majstorovic et al., 2022).

Entwickelt von Feiler und Diermeyer (2021), adressiert dieses Konzept Situationen, in denen die autonome Wahrnehmung falsche Erkennungen oder Objekte fehlinterpretiert, die zu Störung im Fahrzeugbetrieb führen. In solchen Fällen werden die erfassten Wahrnehmungsdaten, in Form einer Objektliste und einer Gitterkarte, an einen menschlichen Bediener übermittelt und in einer 3D-Umgebung visualisiert (Majstorovic et al., 2022). Die daraufhin erfolgende menschliche Beurteilung der Situation erfolgt mithilfe eines Video-Overlays und ermöglicht die Anpassung des Umgebungsmodells des Fahrzeugs an die reale Umgebung, indem problematische Objekte durch Mausklicks und Tastatureingaben markiert werden können (Brecht et al., 2024). Diese Information wird anschließend an das Fahrzeug zurückgesendet. Das Wahrnehmungsmodul des autonomen Fahrzeugs kann nun den markierten Bereich entweder als freien Raum oder als Hindernis klassifizieren. Ist der Weg freigegeben, kann das Fahrzeug seinen Betrieb fortsetzen (Majstorovic et al., 2022).

Feiler und Diermeyer (2021) formulierte darüber hinaus eine Erweiterung des Konzepts, in der Interaktionen mit beliebigen Teilen des Umgebungsmodells eines AVs ermöglicht werden. Dazu zählen bspw. weitere Modifikationen des befahrbaren Raums oder die Vorhersage von Objektbewegungen.

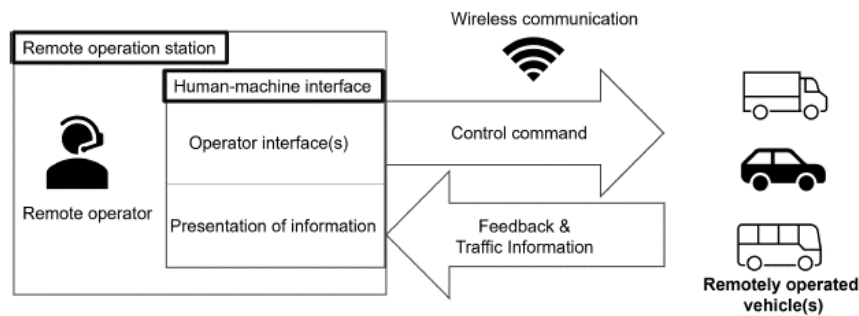


Abbildung 14 Systemarchitektur (Amador et al., 2022)

## 2.5 Systemarchitektur der Teleoperation

Die Systemarchitektur beschreibt den grundlegenden Aufbau eines jeden Teleoperationskonzepts. Sie stellt die Verbindung zwischen dem Operator und dem Fahrzeug dar.

### 2.5.1 Grundaufbau der Systemarchitektur

Die Systemarchitektur eines Teleoperationssystem besteht aus vier unabhängigen Hauptkomponenten (Amador et al., 2022): der Teleoperationsstation, der Mensch-Maschinen-Schnittstelle, der drahtlosen Kommunikation und dem zu teleoperierenden Fahrzeug. Eine Prinzipdarstellung der Systemarchitektur bietet Abbildung 14.

Die teleoperierten Fahrzeuge übermitteln die aktuellen Statusinformationen der DDT mittels einer drahtlosen Netzwerkverbindung an einen Teleoperator. Die Darstellung dieser Informationen erfolgt dann über die Benutzerschnittstelle, welche sich je nach Anwendungsfall und Teleoperationskonzept jedoch stark unterscheiden kann (Amador et al., 2022). Außerdem befinden diese Plattformen in einer ständigen Weiterentwicklung, bedingt durch die Aktualität dieses Themas und des Fehlens eines internationalen Standards (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Aus diesem Grund variiert die Ausprägung der Benutzerschnittstellen zwischen der Darstellung einfacher Tabellen über Bildschirme, bis hin zu Systemen, welche neben audiovisuellen Inhalten auch in der Lage sind, haptische oder bewegungsbasierte Rückmeldungen an den Operator zu übermitteln (Amador et al., 2022).

Die bidirektionale Übertragung von Steuerbefehlen und Sensordaten zwischen der Benutzerschnittstelle und dem ferngesteuerten System ist als Kommunikationskanal definiert. Aufgrund der ständigen Ortsveränderung des Fahrzeugs ist hierbei ein drahtloses Kommunikationsnetzwerk von Nöten. Um eine möglichst zeitnahe Steuerung zu gewährleisten, ist eine Informationsübermittlung in Echtzeit oder mit möglichst

geringer Latenz von großer Bedeutung (Amador et al., 2022; Winfield & Bsc, 2009). Das teleoperierte Fahrzeug führt die übermittelten Befehle aus und erfasst die Umgebungsinformationen, damit diese dem Operator zur Verfügung gestellt werden können (Winfield & Bsc, 2009). Die Komplexität der Systeme in den teleoperierten Fahrzeugen variiert je nach Automatisierungsgrad (SAE-Stufe) des Fahrzeugs. Bei gänzlich nicht automatisierten Systemen wird das Fahrzeug demnach direkt gesteuert - hierfür sind lediglich Sensoren und Aktuatoren auf Seiten des Fahrzeugs notwendig. Bei höheren Automatisierungsgraden bedingt sich die Notwendigkeit komplexerer Systeme durch die Ausführung sowohl taktischer als auch operativer Funktionen (Amador et al., 2022).

Um einen Überblick über einige existierenden Variation dieser Systemarchitekturen aus Industrie sowie Forschung zu bieten, werden im Folgenden einige dieser bestehenden Plattformen hinsichtlich ihrer Hauptkomponenten verglichen.

### **2.5.2 Varianten der Systemarchitektur**

Mehrere Einrichtungen in der akademischen Forschung haben Systemarchitekturen für die Durchführung von teleoperierten Fahrversuchen entwickelt. Das Research Concept Vehicle Model-E wurde am Integrated Transport Research Lab des Royal Institute of Technology als teleoperiertes Fahrzeug eingesetzt (siehe Abbildung 15). Der Hauptfokus lag auf der Untersuchung der Veränderungen in der Fahrerfahrung und des Fahrverhaltens beim teleoperierten Fahren im Vergleich zum herkömmlichen Fahren. Zur Verbesserung der Situationswahrnehmung werden Technologien wie Surround-Sound-Feedback, Vibrationsfeedback und Steering Force Feedback (SFF) genutzt (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024). Um dies zu ermöglichen ist eine spezielle Benutzerschnittstellen-Konfiguration notwendig (siehe Abbildung 16). Diese beinhaltet Surround-Lautsprecher, Vibrationsaktuatoren als auch Lenkkraft-Feedback-Motoren. Weiterhin sind im Fahrzeug zwei Kameras sowie ein mittig platziertes Surround-Mikrofon installiert, um eine visuelle als auch sensorische Rückmeldung an die Benutzerschnittstelle zu ermöglichen.

Weiterhin entwickelten Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt einen Prototypen der Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Teleoperation eines hochautomatisierten Shuttles (SAE Level 4) (Kettwich et al., 2021). Dieser ermöglicht es den Operatoren, die Shuttle-Operation zu überwachen und bei Bedarf einzugreifen. Die Konfiguration besteht dabei aus einer Kombination von herkömmlichen PC-Monitoren sowie einem Touchscreen (siehe Abbildung 17). Die PC-Monitore übertragen neben dem Videostream (obere Reihe), spezifische Informationen über den Zustand des Fahrzeugs, Benachrichtigungen über Störungen sowie die aktuelle Posi-



Abbildung 15 Research Concept Vehicle Model-E (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024)



Abbildung 16 Benutzerschnittstellen-Konfiguration am Integrated Transport Research Lab des KTH Royal Institute of Technology (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024)

tion des Fahrzeugs auf einer Landkarte (mittlere Reihe). Der untere Bildschirm stellt den in den Schreibtisch integrierten Touchscreen dar und bietet die Möglichkeit mit dem System zu interagieren.

Einige Systemarchitekturen im industriellen Sektor zeigen viele Gemeinsamkeiten mit den bisher vorgestellten Architekturen aus der akademischen Forschung. Dazu gehören Unternehmen wie Vay (2024) und Elmo (2024a). Der wesentliche Unterschied zu den Applikationen im akademischen Bereich ist hierbei die höhere Anforderung an die Sicherheit. So nutzt Vay bspw. mehrere Mobilfunknetze in Kombination mit proprietärer Hardware.

Ebenso existieren Firmen, welche sich, im Bezug auf die Benutzerschnittstelle, von den bisherigen Konfigurationen unterscheiden. So stellte Einride (2022) eine innovative Schnittstelle für das teleoperierte Fahren vor. Hier basiert die Steuerung des LKW's auf zwei Knöpfen, welche die Pedalerie und das Lenkrad ersetzen. Die Umgebung des Fahrzeugs, welche durch Kameras als auch Lidar- und Mikrofonsensoren aufgenommen wird, wird dabei auf Monitoren dargestellt. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Benutzerschnittstellen begründen sich in der Abwesenheit einer einheitlichen Regelung in den Auslegungen dieser Systemarchitekturen. Daher findet ei-

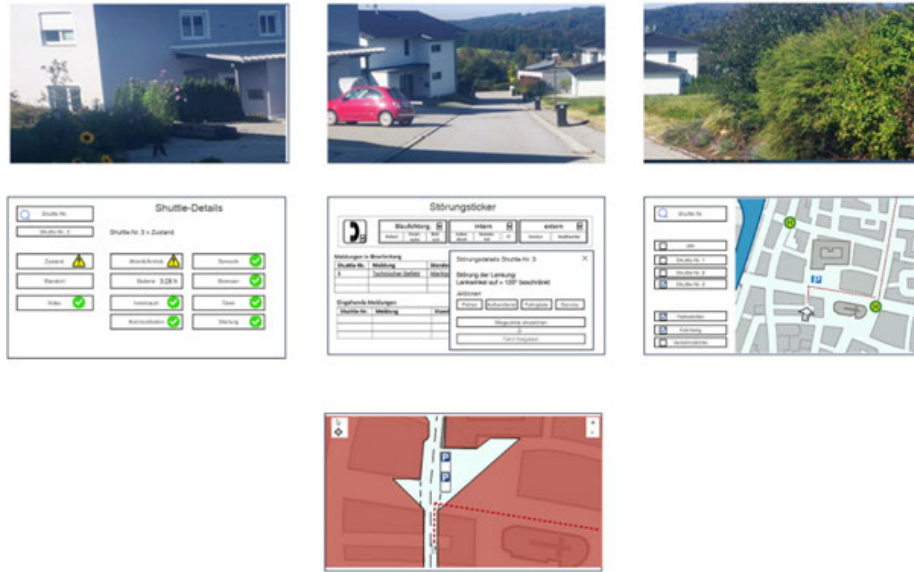


Abbildung 17 Prototyp der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (Kettwich et al., 2021)

ne kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Plattformen statt. Trotzdem oder gerade deshalb ist es von Bedeutung, dass bei der Konzeption Faktoren wie die Fahrleistung, Situationswahrnehmung und kognitive Arbeitsbelastung berücksichtigt werden. Dabei ist ein Kompromiss bei der Erfüllung dieser Anforderungen nicht auszuschließen. Um die optimale Konfiguration zu ermitteln ist weitere Forschung auf diesem Gebiet unabdingbar (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

## 2.6 Anwendungsgebiete der Teleoperation

Es existieren einige Firmen, die die Teleoperation bereits nutzen. Die Anwendungsgebiete werden dabei in öffentliche und nicht-öffentliche Bereiche unterteilt.

### 2.6.1 Anwendungen im Öffentlichen Bereich

Teleoperationstechnologien werden zunehmend im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt. Beispielhaft dafür ist Fernride (2024), welches sich auf ferngesteuerte und autonome LKW's spezialisiert hat. Dabei zielt das Unternehmen darauf ab, mithilfe von Teleoperationssystemen die Transportprozesse zu optimieren, indem ein Fahrer für mehrere Fahrzeuge gleichzeitig verantwortlich sein kann. Außerdem können die Arbeitsbedingungen infolge ergonomischer Arbeitsplätze und der Reduzierung von monotonen Aufgaben verbessert werden.

Ebenso hat sich Einride (2024) auf die Entwicklung und den Betrieb von autonomen, ferngesteuerten und elektrischen Transportlösungen spezialisiert. Wie bereits im vor-

herigen Kapitel erwähnt, basiert deren Teleoperationsplattform auf einer innovativen Benutzerschnittstelle.

Im Bereich des Carsharings nutzen Vay (2024) und Elmo (2024b) Fernsteuerung zur Fahrzeugdisposition. Dadurch können die Flotten flexibler und effizienter eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine schnelle Anpassung an sich ändernde Anforderungen und eine bessere Auslastung der Fahrzeuge.

Unternehmen, welche sich auf selbstfahrende Fahrzeuge spezialisiert haben, nutzen die Teleoperation ebenfalls, um diese in komplexen oder unvorhergesehenen Situationen zu unterstützen. Dazu zählen Firmen wie Cruise (2024), Waymo (2024) und Zoox (2024). Infolgedessen kann die Zuverlässigkeit und Sicherheit autonomer Fahrzeuge erhöht werden, während die Technologie der autonomen Fahrzeuge weiterentwickelt wird.

### **2.6.2 Anwendungen im nicht-Öffentlichen Bereich**

Die Teleoperation hat ebenfalls Einzug in den nicht-öffentlichen Bereich gefunden. Hier hat sie insbesondere den Zweck, durch die physische Trennung des Operators von der Arbeitsumgebung, die Arbeitsbedingungen zu verbessern. Um diese Teleoperationsfähigkeiten zu demonstrieren, steuerte Komatsu (2021) von der MINExpo in Las Vegas aus, einen hydraulischen Bagger in 400 Meilen Entfernung. Dafür nutzten sie eine immersive Darstellung der tatsächlichen Kabinenumgebung der Maschine vor Ort.

Auch Skogforsk (2024), eine führende Forschungsorganisation in Schweden, die sich auf die Forstwirtschaft konzentriert, wenden die Teleoperation an, um Forstmaschinen wie Harvester und Forwarder aus der Ferne zu steuern. Dadurch kann der Arbeitskomfort und die Sicherheit der Bediener erhöht werden.

Weitere Beispiele sind das schwedische Unternehmen Sandvik (2024), welches eine Reihe von ferngesteuerten Bergbaugeräten anbietet, darunter Bohrgeräte, Lader und Muldenkipper, wodurch die Produktivität und Genauigkeit der Operatoren verbessert werden konnte. Und Phantom Auto Phantom Auto (2024) nutzt die Teleoperation von Gabelstaplern um Sicherheit, Effizienz und Produktivität zu verbessern.

## **2.7 Gesetzgebung**

Durch das Fehlen allgemein anerkannter rechtlicher Definitionen für Teleoperationskonzepte, welche nicht auf der direkten Übernahme der Fahrfunktionen basieren (im Sinne der Direct Control), könnte die Implementierung solcher Konzepte erschwert



werden (Linné & Andersson, 2021). Dennoch existieren Ansätze von Definitionen sowohl auf internationaler als auch nationaler Ebene. Im Folgenden werden die rechtlichen Rahmenbedingungen des automatisierten Fahrens und der Teleoperation erläutert. Dabei wird zunächst auf die internationale und europäische Gesetzgebung eingegangen. Anschließend befasst sich Kapitel 2.7.3 mit der deutschen Gesetzgebung.

### 2.7.1 Internationale Gesetzgebung

Die internationale Wiener Straßenverkehrskonvention von 1968 wurde von der Wirtschaftskommission der United Nations (1968) entwickelt und stellt die Basis vieler nationaler Verkehrsgesetze dar. Gemäß diesem Übereinkommen schließt die Definition des „Drivers“ jede Person ein, die ein Kraftfahrzeug steuert. Im klassischen Sinne wird dies mit einer physisch anwesenden Person assoziiert, welche in der Lage ist, die dynamische Fahraufgabe zu übernehmen. Artikel 8, welche näher auf die Definition des „Drivers“ eingeht, erwähnt weiterhin, dass *„jeder Fahrer sollte zu allen Zeiten sein Fahrzeug kontrollieren können“* (übersetzt aus dem Englischen United Nations, 1968, S.11).

Diese Konvention schließt die Möglichkeit der Teleoperation demnach nicht explizit aus. Allerdings ist eindeutig definiert, dass ein automatisiertes System nicht der Definition eines „Drivers“ entspricht. Dies stellt eine rechtliche Hürde bei der Etablierung automatisierter Fahrzeuge dar. Ein Resolutionsentwurf der Arbeitsgruppe 1 (WP.1) des UNECE Global Forum for Road Traffic Safety aus dem Jahr 2020 legte jedoch fest, dass die Regelung des automatisierten Fahrens der nationalen Gesetzgebung unterliegt (UNECE, 2020).

Die WP.1 hat zusätzlich regulatorische Diskussionen zur Teleoperation von Fahrzeugen geführt. Ein informelles Dokument aus dem Jahr 2022 befasst sich mit Teleoperationsszenarien und formuliert ebenfalls Anforderungen an Operatoren sowie Teleoperationssystemen (UNECE, 2022). Dahingehend wird ein „Remote Driver“ als eine Person definiert, welche sich nicht im Fahrzeug befindet und die vollständige dynamische Fahraufgabe übernimmt. Genauer ist diese als *„echtzeit Ausübung aller dynamischen Fahraufgaben und/oder Übernahme der Fahraufgabe als Rückfallebene (inklusive Verzögern, Steuerung, Beschleunigung, Gangschaltung)“* (übersetzt aus dem Englischen UNECE, 2022, S.2) definiert. Demnach bezieht sich diese Definition auf das Teleoperationskonzept des Direct Control.

### 2.7.2 Europäische Gesetzgebung

Auf europäischer Ebene hat die Europäische Kommission am 05. August 2022 die Durchführungsverordnung 2022/1426 angenommen, welche die einheitlichen Verfahren und technischen Spezifikationen für die Typgenehmigung des automatisierten Fahrsystems vollautomatisierter Fahrzeuge regelt (Europäische Kommission, 2022). Artikel 1 definiert dabei den Anwendungsbereich der automatisierten Fahrsysteme wie folgt:

(a) *Vollautomatisierte Fahrzeuge einschließlich Fahrzeuge mit dualem Fahrmodus, die für den Personen- oder Gütertransport innerhalb eines festgelegten Gebiets entworfen und gebaut sind.*

(b) *„Hub-to-hub“: Vollautomatisierte Fahrzeuge einschließlich Fahrzeuge mit dualem Fahrmodus, die für den Personen- oder Gütertransport auf einer festgelegten Strecke mit festen Anfangs- und Endpunkten einer Fahrt entworfen und gebaut sind.*

(c) *„Automatisiertes Parken“: Fahrzeuge mit dualem Fahrmodus, die über einen vollautomatisierten Fahrmodus für Parkanwendungen in vordefinierten Parkeinrichtungen verfügen. Das System kann gegebenenfalls eine externe Infrastruktur (z. B. Ortungsmarkierungen, Wahrnehmungssensoren) der Parkeinrichtung nutzen, um die DDT durchzuführen.*

Diese Verordnung beinhaltet allerdings keine Regelung für das teleoperierte Fahren. Dennoch erfolgt die Begriffsbestimmung eines „Bedieners für den Ferneingriff“ (Europäische Kommission, 2022), welcher im Kontext der Teleoperation und der Definition eines Operators von Interesse ist. Dieser wird als „eine/mehrere Person/en, die sich außerhalb des vollautomatisierten Fahrzeugs befindet/en und die Aufgaben des Bedieners im Fahrzeug aus der Ferne wahrnehmen kann/können“ bezeichnet (Europäische Kommission, 2022, S.5). Außerdem wird folgendes angemerkt: „Der Bediener für den Ferneingriff darf das vollautomatisierte Fahrzeug nicht fahren und das ADS muss weiterhin die DDT wahrnehmen“ (Europäische Kommission, 2022, S.5).

### 2.7.3 Deutsche Gesetzgebung

In Deutschland markierte die Änderung des Wiener Übereinkommens zum 23.03.2016 einen signifikanten Wendepunkt für das automatisierte Fahren. Der 8. Artikel wurde dahingehend erweitert, dass „*Fahrzeugsysteme, die einen Einfluss auf das Führen des Fahrzeugs haben*“ (BGBl. II, 2016, S. 1307), zulässig sind. Diese Änderung ebnete den Weg für die Integration des hoch- und vollautomatisierten Fahrens (SAE-Stufe 3) in das Straßenverkehrsgesetz (StVG) am 21. Juni 2017 durch die Paragraphen 1a

„Kraftfahrzeuge mit hoch- oder vollautomatisierten Fahrfunktionen“ und Paragraph 1b „Rechte und Pflichten des Fahrzeugführers bei Nutzung hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktionen“ (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2017).

Das Gesetz sieht vor, dass die Übernahme der Fahrfunktionen durch das automatisierte System unter bestimmten Voraussetzungen zulässig ist. Weiterhin wird der „Fahrer“ als Person definiert, *„der eine hoch- oder vollautomatisierte Fahrfunktion [...] aktiviert und zur Fahrzeugsteuerung verwendet, auch wenn er im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung dieser Funktion das Fahrzeug nicht eigenhändig steuert“* (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2017, S. 1648). Des Weiteren wird angemerkt, dass der Fahrer sich vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugsteuerung abwenden darf, solange er wahrnehmungsbereit bleibt.

Das am 12. Juli 2021 in Kraft getretene „Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren“ (BGBl. I, 2021), ergänzt das Straßenverkehrsgesetz um mehrere Paragraphen. Diese Gesetze ermöglichen den Einsatz von Kraftfahrzeugen mit autonomen Fahrfunktionen in festgelegten Betriebsbereichen auf öffentlichen Straßen. Dabei muss kein Fahrer physisch anwesend sein - eine verantwortliche Person wird dennoch benötigt. Aus diesem Grund sieht das Gesetz einen „technischen Aufseher“ vor, der die Verantwortung gegenüber der Einhaltung der Verkehrspflichten trägt. Dieser muss die Ausführung der Fahrfunktionen nicht durchgehend kontrollieren, aber dennoch in der Lage sein in Notfallsituationen die Kontrolle zu übernehmen. Diese Funktion kann ein teleoperierender Operator übernehmen.

### 3 Herausforderungen der Teleoperation

Die Teleoperation ist ein Schlüsselement bei der Umsetzung von Ansätzen der Industrie 5.0, da es die Brücke zwischen menschlicher Intuition und maschineller Effizienz schlägt. In diesem Kontext ermöglicht die Teleoperation eine effiziente, sichere und flexible Mensch-Maschine-Interaktion. Gefährliche oder schwer zugängliche Arbeitsumgebungen können sicherer gestaltet werden, indem es den Menschen ermöglicht wird, die Maschinen aus der Ferne zu steuern, anstatt direkt vor Ort zu sein.

Teleoperatoren stehen dennoch vor diversen Herausforderungen. Diese entstehen zum einen als Folge der Entkopplung der natürlichen Wahrnehmung von der physischen Umgebung, was die Situationswahrnehmung der Operatoren beeinträchtigt (Henriksson & Rehnmark, 2023). Hinzu kommt, dass Teleoperatoren in den meisten Fällen für eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeuge verantwortlich sind und hinzugezogen werden, wenn das autonome Fahrzeug Unterstützung benötigt. Die Operatoren müssen das Situationsbewusstsein infolge der Übergabeverfahren immer wieder von neuem aufbauen und sich in die neue Umgebungssituation einarbeiten (Mutzenich et al., 2021). Ein Vernachlässigen solcher Herausforderungen bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle könnte zu schlechten Benutzererfahrungen führen (Henriksson & Rehnmark, 2023) und die Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit des Operator maßgeblich beeinflussen (Hoffmann & Diermeyer, 2021).

Die Wahrnehmung des Teleoperators wird außerdem durch die Gesamtlatenz des Systems beeinträchtigt, was zusätzlich zu einem fehlenden Gefühl der Verkörperung im teleoperierten Fahrzeug beitragen kann (Mutzenich et al., 2021). Dabei setzt sich die Gesamtsystemlatenz zum einen aus Verzögerungen bei der Signalübertragung durch Netzwerkverzögerungen zusammen, welche zum Großteil durch die Bandbreite (Mansour et al., 2012), Latenz und Jitter bestimmt wird (Chucholowski et al., 2014; Liu et al., 2017). Dazu kommen Aktuatorlatenzen, also die Zeitdifferenz zwischen Eingabe des Operators und der Ausführung auf Seiten des Fahrzeugs (Georg, Feiler et al., 2020). Auch die Netzwerkleistung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Latenz. So kann sich die Latenzzeit im 5G-Netzwerk, im Vergleich zum 4G-Netzwerk, halbieren.

Die Herausforderungen der Teleoperation lassen sich demnach in die Kategorien *Situationswahrnehmung* bzw. *Situationsbewusstsein* und *Latenz* einordnen und können gemeinsam die Fahrleistung reduzieren und die mentale Belastung während der Teleoperation erhöhen, sodass die Sicherheit und Effizienz der Teleoperation beeinträchtigt wird (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024). Ebenso wird kurz, im Sinne einer

weiteren Herausforderung der Teleoperation, auf die Anforderungen an die Qualifikationen der Operatoren eingegangen.

In Kapitel 4 werden Ansätze vorgestellt, die sich mit der Bewältigung dieser Herausforderungen befassen. Dafür ist zunächst das Verständnis der tiefgreifenderen Faktoren notwendig, welche die Situationswahrnehmung und Latenz beeinflussen.

### 3.1 Situationsbewusstsein

Eine spezifische Definition des Situationsbewusstseins bietet M. R. Endsley (aus dem Englischen übersetzt 1988a, S.792): *„Situationsbewusstsein ist die Wahrnehmung der Elemente in der Umgebung innerhalb eines bestimmten Zeit- und Raumbereichs, das Verständnis ihrer Bedeutung und die Vorhersage ihres Zustands in der nahen Zukunft.“* Weiter gliedert M. R. Endsley (1988b) das Situationsbewusstsein in drei Reaktionsstufen:

1. Wahrnehmung (Stufe 1): Die Wahrnehmung von Elementen in der aktuellen Umgebung, inklusive der relevanten Merkmale.
2. Verständnis (Stufe 2): Die Bildung eines ganzheitlichen Bildes der Umgebung und dessen Verständnis.
3. Projektion (Stufe 3): Die Fähigkeit, zukünftige Handlungen der Elemente in der Umgebung zu projizieren.

Bezogen auf das teleoperierte Fahren umfasst Stufe 1 demzufolge die Kenntnis über den Standort nahegelegener Objekte. Beispiele dafür sind Fußgänger oder andere Fahrzeuge, als auch die Tageszeit und aktuellen Wetterbedingungen. Die Distanzwahrnehmung zu nahegelegenen Objekten sowie die Einflüsse von Wetter- und Fahrbahnbedingungen, stellt die zweite Stufe dar. Aufgrund von der sich stetig verändernden Umgebung, den Handlungen des Operators selbst als auch denen der anderen Verkehrsteilnehmer, erfolgt eine kontinuierliche, sich wiederholende Analyse dieser beiden Stufen. Das Abschätzen von Kollisionswahrscheinlichkeiten mit anderen Umgebungselementen sowie Prognosen über die Zeitdauer, die benötigt wird, um bestimmte Distanzen zurückzulegen, stellt dabei die dritte Stufe des Situationsbewusstseins dar (Mutzenich et al., 2021).

So ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen beim Aufbau und Erhalt eines ausreichenden Situationsbewusstseins. Die Konfrontation mit neuen Umgebungssituationen, bedingt durch die Verantwortung des Teleoperators gegenüber meist mehreren Fahrzeugen (auch „Out of the Loop“-Syndrom genannt), das fehlende physische

Anwesenheitsgefühl sowie die Arbeitsbelastung gelten hierbei als spezifische Herausforderungen für die Teleoperatoren (Mutzenich et al., 2021). Im Folgenden wird jede dieser Herausforderungen genauer erörtert.

### **3.1.1 Out of the Loop Syndrome (OOTL)**

Das „Out of the Loop“-Syndrom beschreibt die Veränderung des Situationsbewusstseins für einen menschlichen Operator aufgrund der nicht-Eingebundenheit in den physischen Steuerungsprozess. Der Operator befindet sich nicht im Fahrzeug und ist daher „außerhalb der Schleife“. Diese Folge der Automatisierung führt zu einer Beeinträchtigung der Umgebungswahrnehmung und ist ursächlich für den erhöhten Zeitaufwand bei der Herstellung einer ausreichenden Situationswahrnehmung (Radlmayr et al., 2014).

Mok et al. (2017) fanden heraus, dass es 5–8 Sekunden dauert, bis ein Fahrer die Kontrolle über ein automatisiertes Fahrzeug der Stufe 3 zurückgewinnt, nachdem dieser an einer aktiven Nebenaufgabe beteiligt war. Jedoch saßen die Teilnehmer während des Versuchs noch im Fahrzeug. Für Teleoperatoren, die nicht im Fahrzeug sitzen, könnte diese Übernahmezeit noch länger sein. Denn Gugerty (1997) zufolge nehmen Personen, die physisch im Fahrzeug sitzen, immer noch unbewusst Informationen über die Umgebung und den Fahrzeugzustand auf.

### **3.1.2 Arbeitsbelastung**

In Hinsicht auf die Arbeitsbelastung stellt die Erhöhung der Informationsdichte - ein Ansatz um die Situationswahrnehmung zu verbessern - eine Gefahr dar (Ottesen, 2014). Die Bereitstellung zusätzlicher Informationen für die Teleoperatoren kann sowohl Vorteile als auch Risiken mit sich bringen. Zum einen kann eine erhöhte Informationsmenge zu einer kognitiven Überlastung führen. Jede zusätzliche Information erfordert eine Verarbeitungsleistung, so dass die Entscheidungsfindung für die Teleoperatoren erschwert wird (Ottesen, 2014). Zum anderen könnte eine zu geringe Arbeitsbelastung ebenfalls problematisch sein. In Situationen mit einer geringen Aufgabenlast, könnte das OOTL-Syndrom auftreten. Infolgedessen nimmt die Wachsamkeit der Teleoperatoren ab, da diese nicht regelmäßig gefordert werden. Die Balance zwischen Über- und Unterforderung ist daher entscheidend für die Aufrechterhaltung der Sicherheit und Effektivität der Teleoperation (Mutzenich et al., 2021).

Auch die Art der Autonomie kann die Arbeitsbelastung der Teleoperatoren beeinflussen (Mutzenich et al., 2021). Unterschiedliche Einsatzbereiche, wie autonome Ferntransporte im Gegensatz zu lokalen Lieferrobotern, stellen unterschiedliche Anforde-

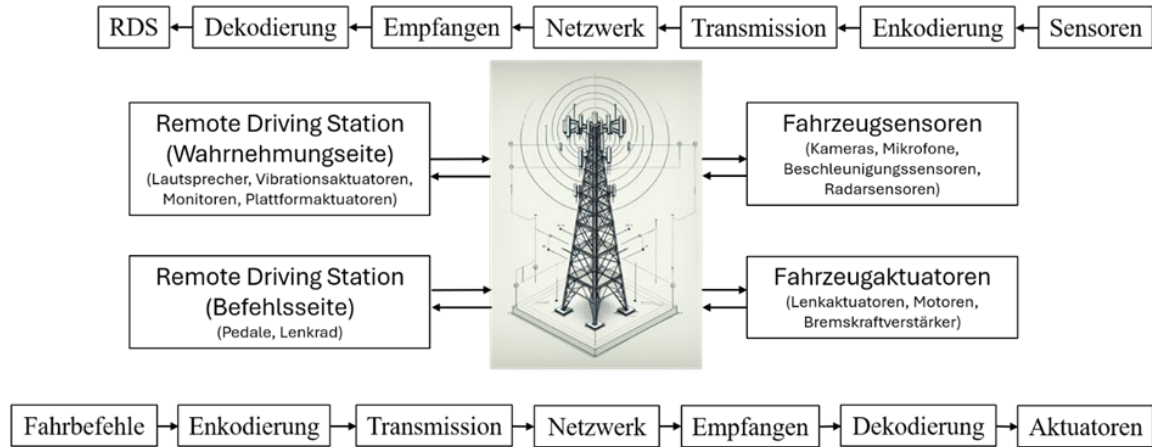


Abbildung 18 Bestandteile der Systemlatenz in Anlehnung an (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024)

rungen an den Bediener. Während Fahrzeuge, welche bei geringen Geschwindigkeiten betrieben werden, möglicherweise auch zu einer geringeren Arbeitsbelastung führen, können Fahrzeuge in komplexen Logistikumgebungen, wie Laderampen oder Tankstellen, höhere Anforderungen stellen (Mutzenich et al., 2021).

### 3.2 Latenz

Die Gesamtlatenz bei der Teleoperation umfasst sowohl die Verzögerung von der Benutzerschnittstelle zum Fahrzeug als auch die Verzögerung bei der Rückübermittlung. So setzt sich die Gesamtverzögerung oder Gesamtlatenz des Systems aus verschiedenen Quellen zusammen. Dazu zählen Sensorlatenzen, Netzwerklatenzen, Signalcodierungs- und Decodierungslatenzen sowie Aktuatorlatenzen (siehe Abbildung 18). Aufgrund der Vielzahl an Latenzquellen ist es schwierig, alle Verzögerungen bei der Teleoperation zu entfernen und dadurch ein Fahrerlebnis, wie in einem realen Auto zu schaffen (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Infolgedessen kann das Fahrverhalten (Beschleunigung, Verzögerung, Lenkung), die mentale Arbeitsbelastung, die Fahrleistung (Spurhalten und Geschwindigkeitskontrolle) sowie die emotionale Reaktion des Operatoren beeinflusst werden (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Studien haben dabei gezeigt, dass eine konstante Gesamtlatenz von unter 170 Millisekunden (ms) die Teleoperationsleistung nur in geringen Maßen beeinflusst (Chen et al., 2007; Gnatzig et al., 2013). Weiterhin wurde gezeigt, dass Teleoperatoren in der Lage sind, ihre Steuerbefehle dahingehend anzupassen, dass sie Latenzeffekte von 300ms kompensieren können. Bei einer Latenz unterhalb dieser Schwelle, können die Operatoren das Fahrzeug weitestgehend effizient steuern. Überschreitet die Gesamtlatenz jedoch den Grenzwert von 300ms, beginnen Teleoperatoren, ein abwartendes

Verhalten zu zeigen. Sie warten nach jeder Aktion auf das Feedback zu ihrem letzten Befehl, bevor sie den nächsten Befehl geben. Dies führt zu einer weniger kontinuierlichen und damit weniger effizienten Steuerung (Bodell & Guliksson, 2016). Wenn die Gesamtlatenz mehr als 700ms beträgt, verschlechtert sich die Fahrleistung erheblich (Chen et al., 2007).

Auf Seiten des Fahrzeugs können latenzbedingte Änderungen im Fahrverhalten Einfluss auf den Energieverbrauch, den Fahrkomfort, die Bewegungskrankheit der Passagiere sowie den Lebenszyklus des Fahrzeugs haben (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Diese Auswirkungen der Latenz werden im Folgenden detailliert erläutert.

### **3.2.1 Einfluss der Latenz auf Fahrleistung und Mentale Arbeitsbelastung**

Ouden et al. (2022) stellten fest, dass eine hohe Latenz zu Verzögerungen bei der Ausführung von Steuerbefehlen führen kann. Dadurch wird die Genauigkeit und Reaktionszeit beeinträchtigt. Neumeier et al. (2019) betonen ebenfalls die Bedeutung der Latenz für die Effektivität der Teleoperation. Die Studie ergab, dass eine konstante und niedrige Latenz wichtig ist, um die Arbeitsbelastung zu minimieren.

Die Studie der Universität Michigan von Lu et al. (2019) erprobte die Auswirkungen von Zeitverzögerungen auf die Arbeitsbelastung und die Teleoperationsleistung von menschlichen Bedienern. Die Ergebnisse zeigen, dass es ab einer Latenz von 75ms zu einer signifikanten Erhöhung der Arbeitsbelastung der Bediener kommt. Auch die Leistung der Bediener verschlechtert sich infolgedessen - sowohl bei der primären Zielerkennung als auch bei sekundären Aufgaben wie der Alarmerkennung.

Gorsich et al. (2018) analysierten Daten aus Simulationen mit menschlicher Beteiligung und früheren Studien, um empirische Beziehungen zwischen Latenz, Durchschnittsgeschwindigkeit und Spurhaltefehlern zu etablieren. Dabei stellten sie fest, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit mit zunehmender Latenz abnimmt. Auch verschlechtert sich die Genauigkeit, was zu größeren Abweichungen von der geplanten Route führt. Zudem konnte bei einer Latenz von etwa 600ms ein signifikanter, plötzlicher Leistungsabfall beobachtet werden.

Auch Nakamura (2021) erforschten die Toleranz für Signalverzögerungen bei teleoperierten Fahrzeugen mithilfe von Simulationen in einem Fahrsimulator. Dabei erkannten sie, dass Spurhaltefahrten mit konstanter Geschwindigkeit bei Verzögerungen von 200 – 400ms nicht bewältigt werden können. Beim Wechseln der Spur mit 80km/h stellt bereits eine Verzögerung von 100ms ein zu hohes Risiko dar.



### 3.2.2 Einfluss der Latenz auf Emotionale Zustände

Yang und Dorneich (2017) evaluierten die Auswirkungen variabler Zeitverzögerungen auf die Emotionen und die Arbeitsbelastung der Teleoperatoren. Die Ergebnisse zeigen, dass Frustration, Ärger und Arbeitsbelastung zunahm, was sich negativ auf die Motivation und Zufriedenheit auswirkt, während die Fahrleistung bei intermittierenden und variablen Rückmeldungsverzögerungen abnahm.

### 3.3 Mitarbeiterqualifikation

Angesichts des potenziell hohen Stresslevels und der Spezialisierung der Fernbedienungsarbeiten ist eine angemessene Schulung und Regulierung der Teleoperatoren unerlässlich, um eine sichere und effektive Leistung zu gewährleisten (Hampshire et al., 2020). Die Teleoperation stellt spezifische Anforderungen hinsichtlich ihrer Qualifikationen an die Operatoren. Die überwiegend kognitive Arbeit erfordert eine schnelle Erkennung und Identifikation der Fehler bei Übernahme der Kontrolle über ein autonomes Fahrzeug. Darüber hinaus ist die Fähigkeit im Umgang mit potenziell hohen Stressniveaus nach langen Perioden geringer Arbeitsbelastung essenziell (Hampshire et al., 2020).

Weiterhin müssen, im Vergleich zur Fahraufgabe in realen Fahrzeugen, Entscheidungen auf Basis einer reduzierten Verfügbarkeit von Informationen getroffen werden. Damit einher geht die Fähigkeit ein schnelles Bewusstsein für die jeweilige Situation zu entwickeln, trotz einer physischen Trennung von Fahrzeug und Operator. Zusätzlich wird dies durch eine sich kontinuierlich verändernde Umgebungssituation auf Seiten des Fahrzeugs erschwert, einhergehend mit potenziellen Konnektivitätsproblemen (Schwindt et al., 2023).

## 4 Lösungsansätze der Teleoperation

Die diversen Herausforderungen der Teleoperation bieten zahlreiche Möglichkeiten für Optimierung. Im Folgenden werden verschiedene Lösungsansätze vorgestellt, die sich auf die Hauptherausforderungen, d.h. die Verbesserung der Situationswahrnehmung sowie der Latenzen beziehen.

### 4.1 Situationswahrnehmung

Beim teleoperierten Fahren kann für die Operatoren potenziell nicht das gleiche Maß an Situationswahrnehmung erreicht werden, wie beim Fahren in einem realen Fahrzeug. So bestehen die Schwierigkeiten beim teleoperierten Fahren beispielsweise darin, die Fahrzeuggeschwindigkeit, Bewegungsveränderungen und die Trajektionen beweglicher Objekte über die Monitore richtig wahrzunehmen und einzuschätzen. Aufgrund dieser Differenz in der Wahrnehmung wird der Prozess der Entscheidungsfindung maßgeblich beeinflusst (M. Endsley, 2000).

Um diese Probleme zu überwinden, ist es entscheidend, dass der Bediener sich visuell in die Umgebung des Roboters eingebunden fühlt, was durch ausreichende Videoinformationen unterstützt wird (Opiyo et al., 2021). Im Vergleich zu einer einzelnen sensorischen Rückmeldung hat sich gezeigt, dass die Integration von multisensorischen Eingaben die Immersion und das Präsenzgefühl signifikant steigert (Kim et al., 2004). Beispielsweise erzeugt eine Kombination aus visuellem, auditivem und taktilen Feedback ein stärkeres Gefühl der Präsenz als lediglich ein erhöhter Foto-realismus im visuellen Feedback (Luciani, 2004). Um Teleoperatoren eine möglichst adäquate Darstellung des Fahrerlebnisses zu bieten, gibt es daher eine Reihe technischer Möglichkeiten, die sensorische Rückmeldung an der Operator zu erhöhen. Diese Feedbackformen lassen sich in visuelles Feedback, Lenkkraft-Feedback, Bewegungs-Feedback und Audio-/Vibrations-Feedback gliedern (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Im Folgenden werden die unterschiedlichen Formen des Feedbacks detailliert vorgestellt.

#### 4.1.1 Visuelles-Feedback

Die Umgebungswahrnehmung beim Remote Driving findet im Wesentlichen durch die Übertragung der Kamerabilder statt. Dabei gibt es unterschiedliche Technologien, welche die Situationswahrnehmung des Operators erhöhen und diesen bei der Fahraufgabe unterstützen. Zunächst werden die Technologien der Virtual Reality

(VR), Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR) erklärt. Anschließend werden unterschiedliche Formen des visuellen Feedbacks vorgestellt. Visuelles Feedback kann je nach Funktion in fünf Kategorien unterteilt werden. Demnach kann das visuelle Feedback dem Operator dabei helfen, (a) mehrere Sensorinformationen zu fusionieren; (b) die Position zu bestimmen; (c) die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs zu bestimmen; (d) die Geschwindigkeitswahrnehmung zu verbessern; (e) die Distanz zwischen dem Fahrzeug und Objekten besser einzuschätzen (Zhao, Nybacka & Rothhämel, 2023).

#### *Definition und Anwendung von VR, AR und MR*

Die Virtuelle Realität (im Englischen Virtual Reality, kurz VR) ist eine fortschrittliche Technologie, die eine virtuelle Umgebung simuliert. In dieser Umgebung ist es dem Benutzer möglich mit der Umwelt zu interagieren und diese aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten (J. M. Zheng et al., 1998).

Die Erweiterte Realität (im Englischen Augmented Reality, kurz AR) hingegen beschreibt eine Technologie, die digitale Inhalte wie Grafiken, Texte oder Videos in die reale Umgebung integriert, sodass diese Inhalte als Teil der realen Welt erscheinen. Diese Definition wurde von Azuma et al. (2001) präzisiert, die AR als ein System beschreiben, das virtuelle Objekte in die reale Welt einbettet, so dass sie scheinbar im selben Raum koexistieren. Die Hauptfunktion von AR besteht darin, die menschliche Wahrnehmung und Interaktion mit der realen Welt zu verbessern, indem zusätzliche Informationen in Form von überlagerten digitalen Daten bereitgestellt werden. Im Gegensatz zur VR, die den Benutzer vollständig in eine digitale Umgebung eintauchen lässt, ergänzt AR die reale Welt und ermöglicht es dem Benutzer, ein tieferes Verständnis und eine verbesserte Interaktion mit seiner Umgebung zu erlangen. Diese Technologie findet insbesondere in der Robotik Anwendung, wo sie bei der Teleoperation eingesetzt wird, um das Gefühl der Präsenz in einer entfernten Umgebung zu verstärken (Opiyo et al., 2021).

Während AR die reale Welt mit virtuellen Elementen erweitert, verschmelzen virtuelle und reale Welt innerhalb der gemischten Realität (im Englischen Mixed Reality, kurz MR). So gesehen ist MR eine Erweiterung von AR, bietet jedoch eine tiefere Integration, indem der Grad der Interaktion physischer und digitaler Objekte erhöht wird (Milgram & Kishino, 1994). Diese Integration verbessert das Präsenzgefühl des Operators, indem sie es ihm ermöglicht, die Umgebung des Fahrzeugs zu analysieren, bevor er Befehle zur Ausübung der dynamischen Fahraufgabe erteilt (Opiyo et al., 2021).

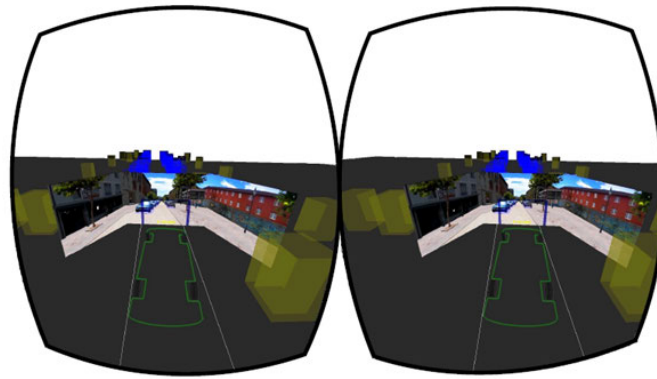


Abbildung 19 MR-Ansicht über ein HMD (Hosseini & Lienkamp, 2016)

#### *Visuelles Feedback durch die Fusion mehrerer Sensorinformationen*

Die Herausforderung, die 360-Grad-Umgebungen eines Fahrzeugs mit nur einer Kamera abzubilden, führt zu Schwierigkeiten für Operatoren das Fahrzeug effizient zu steuern. Um dieses Problem zu adressieren, werden mehrerer Sensoren fusioniert, um eine immersive Anzeige zu schaffen. Die Technische Universität München hat eine Open-Source-Teleoperationssoftware veröffentlicht, die sowohl Lidar- als auch Kamerainformationen integriert, um das Situationsbewusstsein der Bediener zu verbessern (Schimpe et al., 2022). Weiterhin verglichen Georg, Putz und Diermeyer (2020) den Einfluss eines traditionellen Monitors, eines fusionierten Monitors und eines Head-Mounted Display (HMD) auf das Situationsbewusstsein. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine Präferenz für VR-Headsets, die eine effektive Verbesserung des Situationsbewusstseins ermöglichten, allerdings mit dem Nachteil, dass sie leicht Reisekrankheit verursachen können. Eine MR-Ansicht über ein HMD zeigt Abbildung 19.

#### *Visuelles Feedback zur Selbstlokalisierung*

Im Rahmen des teleoperierten Fahrens kommt es häufig, aufgrund der eingeschränkten Sicht auf die Umgebung infolge der Kamerabilder, zu einem schwer einschätzbaren Positionsgefühl. VR ermöglicht dem Operator hierbei, eine virtuelle Umgebung aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten und mit dieser zu interagieren, was zu einer verbesserten Positionswahrnehmung führt (Rodriguez et al., 2002). Um dieses Problem weiter anzugehen, ermöglichen Vozar und Tilbury (2012) die Abbildung mehrerer Kameraperspektiven, so dass der Operator die Fahrzeugposition aus mehreren Blickwinkeln beurteilen kann. Das in dieser Studie implementierte MR-Interface stellt eine Kombination aus einem „First-Person“-Video-Feed mit AR-Overlay und einem „Third-Person“-VR Display dar und ermöglicht dadurch eine flexible Betrachtung der Fahrzeugumgebung aus verschiedenen Perspektiven, wodurch die räumliche Wahrnehmung des Operators verbessert wird.

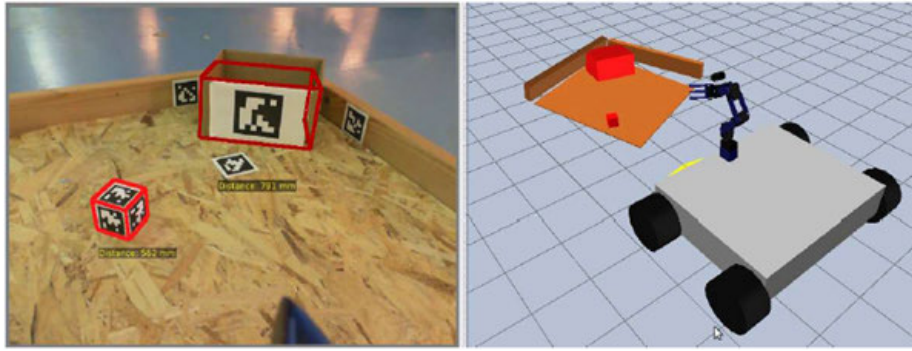


Abbildung 20 MR Interface; AR - links; VR - rechts (Vozar & Tilbury, 2012)

Weiterhin erforschten Chellali und Baizid (2011) den Mehrwert für die Selbstlokalisierung durch den Einsatz von 3D-Karten. Dabei wurde festgestellt, dass 3D-Karten einen positiven Einfluss auf die Selbstlokalisierung haben. Dennoch stieg durch den zusätzlichen Informationsgehalt die Bearbeitungszeit. Beide Studien verbessern die Fähigkeit zur Selbstlokalisierung, erhöhen jedoch den zu verarbeitenden Informationsgehalt. Deshalb benötigt es insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten direktere und reduzierte Information um ein Ablenken des Operators zu verhindern (Zhao, Nybacka & Rothhämel, 2023).

Hosseini und Lienkamp (2016) stellten einen Ansatz zur Visualisierung der Fahrzeuggrenzen vor. Hierbei wird das virtuelle Bild der Fahrzeuggrenzen mit den übertragenen Bildern der Fahrzeugumgebung überlagert und durch ein HMD visualisiert. Dies gibt dem Operator ein klares Bewusstsein für die spezifische Fahrzeugposition und ermöglicht eine präzisere Steuerung. Trotz der Vorteile der HMDs gibt es auch Herausforderungen, wie die Notwendigkeit, die Bewegungen der Kamera und des HMDs zu synchronisieren, um eine klare Wahrnehmung der Umgebung zu gewährleisten. Unsynchronisierte Bewegungen können zu einer schlechten Anzeigequalität führen und das Risiko von Bewegungskrankheiten erhöhen (Allison et al., 2001; Amanatidis et al., 2008). Zudem kann das Tragen eines HMDs schwer sein und den Operator ermüden, was die visuell-motorische Leistung beeinträchtigt (Guillaume Doisy et al., 2017). Abbildung 20 zeigt ein MR-Interface. Links ist ein Frame eines AR-Videofeeds zu sehen, in dem virtuelle Objekte hervorgehoben worden sind. Das rechte Bild zeigt eine VR-Szene, in der das Fahrzeug aus jeder beliebigen Perspektive betrachtet werden kann.

#### *Visuelles Feedback zur Richtungswahrnehmung*

Bedingt durch eine fixierte Position der Kamera beim teleoperierten Fahren, stellt das Feststellen der Bewegungsrichtung eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund führen Fabris et al. (2021) ein Head-Worn Display (HWD) ein, das mit einem Kopftra-



Abbildung 21 HWD mit Kopftracker und Joystick (Fabris et al., 2021)

cker ausgestattet ist, wodurch eine Ausrichtung der Kamera entsprechend der Kopfbewegungen ermöglicht wird. Aufgrund dessen ist eine detaillierte Beobachtung der Umgebung möglich und führt zu einer präziseren Steuerung insbesondere bei komplexen Umgebungssituationen und geringen Geschwindigkeiten. Allerdings führt die Bewegung des Kopfes zu einer Einschränkung des Blickes in Fahrtrichtung, was bei höheren Geschwindigkeiten ein Sicherheitsrisiko darstellen kann (Zhao, Nybacka & Rothhämel, 2023). Abbildung 21 zeigt die in Fabris et al. (2021) verwendete Benutzerschnittstelle. Sie besteht aus dem HWD mit Kopftracker und einem Joystick.

#### *Visuelles Feedback zur Geschwindigkeitswahrnehmung*

Tang et al. (2013) untersuchten den Einfluss von Unschärfe auf die Geschwindigkeitswahrnehmung bei ferngesteuerten Straßenfahrzeugen, welche im realen Kontext durch die Veränderung vom Motorsound sowie Umgebungsveränderungen wahrgenommen wird. Zur Erzeugung der Bewegungsunschärfe werden zum einen zwei oder mehr Bilder eines Videos übereinandergelegt. Dadurch werden nur bewegte Objekte unscharf. Zum anderen werden die Doppelungen der Kamerabilder erzeugt, leicht gestreckt und über das jeweilige Original gelegt, sodass eine Zoom-Unschärfe generiert wird (siehe Abbildung 22). Dies wird nur auf die äußeren Bereiche des Bildes angewandt, um nicht die Sicht des Fahrers zu beeinträchtigen.

Durch diese Techniken kann die Geschwindigkeitswahrnehmung bei der Teleoperation von Fahrzeugen verbessert werden, ohne die zentrale Sicht des Fahrers zu verschlechtern. Damit einher geht allerdings eine umfangreiche Parametereinstellung, sowie die Technik bedingte Verringerung der seitlichen Sicht.



Abbildung 22 Kamerabild mit Zoom-Unschärfe (Tang et al., 2013)

### *Visuelles Feedback zur Distanzwahrnehmung*

Zentral für die Steuerung eines Fahrzeugs ist die Distanzeinschätzung zu Objekten in der Umgebung. Um diese zu verbessern, verwenden Tyczka et al. (2012) eine Kombination aus hochauflösenden Kameras und einer stereoskopischen Sicht, bei der zwei leicht unterschiedliche Bilder jeweils einem Auge präsentiert werden, um einen dreidimensionalen Effekt zu erzeugen. Dabei wird die Tiefenwahrnehmung erheblich verbessert, da diese Technik dem menschlichen Sehen ähnelt. Aufgrund der hohen benötigten Bandbreite steigt wiederum die Gesamtlatenz des Systems.

Y. Luo et al. (2022) untersuchten den Einsatz von VR-HMDs in Bezug auf die Herausforderung der Distanzwahrnehmung in den 2D-Ansichten des HMDs. Des Weiteren fügten sie dem System Off-Screen-In-Device-Feedback wie vibro-taktile und licht-visuelle Hinweise hinzu, um Echtzeit-Entfernungsinformationen bereitzustellen, ohne die Latenz zu erhöhen. Infolgedessen konnte eine reduzierte Arbeitsbelastung und eine bessere Benutzerfreundlichkeit hinsichtlich der Operatoren festgestellt werden. Georg und Diermeyer (2019) stellten zudem fest, dass HMDs, insbesondere durch das Ermöglichen einer benutzerfreundlicheren Darstellung von Sensordaten, die Distanzwahrnehmung verbessert.

Eine Übersicht, über die vorgestellten Formen des visuellen Feedbacks, bietet Abbildung 23.

#### **4.1.2 Lenkkraft-Feedback**

Aufgrund der direkten, physischen Verbindung konventioneller Lenksysteme wird dem Fahrer ein realistisches Gefühl für die Straße und die Reifen vermittelt. Beim teleoperierten Fahren fehlt diese mechanische Verbindung. Die Lenkbefehle des Fahrers werden, ähnlich wie beim Steer-by-Wire-System (SbW), elektronisch an die Aktua-

| Funktion                       | Methode  | Vorteile  | Nachteile  |
|--------------------------------|--|---|--|
| Fusion von Sensorinformationen | Fusion von Lidar-/Kamerainformationen (Schimpe et al. 2022), Darstellung über VR-Headset (Georg et al. 2020b)  | Verbesserung der SA                                   | Risiko der Reisekrankheit  |
| Selbstlokalisierung            | Kombination aus AR und VR (Vozar und Tilbury 2012), Verwendung von 3D-Karten (Chellali und Baizid 2011), Visualisierung der Fahrzeuggrenzen (Hosseini und Lienkamp 2016) | Verbessern Fähigkeit zur Selbstlokalisierung          | Erhöhung des Informationsgehalts durch dritte Dimension; Ablenkungspotenzial |
| Richtungswahrnehmung           | Kameraausrichtung auf Basis von Kopfbewegungen (Fabris et al. 2021)  | Präzisere Steuerung besonders in komplexen Umgebungen | Sicherheitsrisiko bei höheren Geschwindigkeiten                              |
| Geschwindigkeitswahrnehmung    | Erzeugung einer Bewegungsunschärfe (Tang et al. 2013)  | Sensibilisierung von Geschwindigkeitsveränderungen    | Umfangreiche Parametereinstellung, Verringerung der seitlichen Sicht         |
| Distanzwahrnehmung             | HD/stereoskopischen Kameras (Tyczka et al. 2012), vibro/visuelle Hinweise (Luo et al. 2022), Darstellung von Sensordaten im HMD (Georg und Diermeyer 2019)               | Verbesserung der Tiefenwahrnehmung                    | Potenzielle Erhöhung der Latenzen  |

Abbildung 23 Übersicht über das visuelle Feedback in Anlehnung an Zhao, Nybacka, Aramrattana et al. (2024)

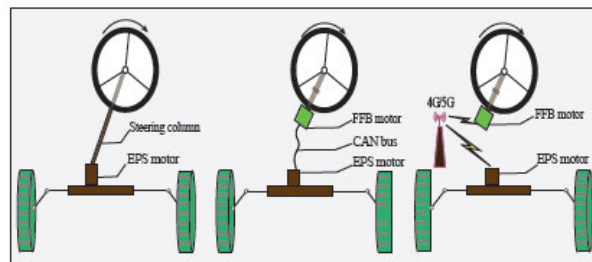


Abbildung 24 Steuerungssysteme. Konventionelles Fahrzeug (links); SbW-Fahrzeuge (mitte); Teleoperierte Fahrzeuge (rechts) (Zhao, Nybacka & Rothhämel, 2023)

toren der Räder übertragen. Die Übertragung findet jedoch nicht wie bei konventionellen Fahrzeugen über das Controller Area Network des SbW-Systems, sondern über das 4/5G-Netz statt, wodurch eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ermöglicht werden, was aber auch potenzielle Herausforderungen in Bezug auf Latenz und Sicherheit mit sich bringt (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Eine Prinzipdarstellung bietet Abbildung 24.

Einige haptische Feedbackmethoden, welche im SbW-System bereits Anwendung gefunden haben, können dennoch als Referenz im teleoperierten Fahren dienen. Die Feedback-Systeme umfassen verschiedene Modelle, die jeweils auf unterschiedlichen Ansätzen basieren (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024). Im Folgenden werden die verschiedenen Technologien zur Erzeugung eines Lenkkraft-Feedbacks dargelegt und ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf das teleoperierte Fahren beleuchtet.



Das *physikalische modellbasierte Lenkkraft-Feedback* ist eine Methode zur Erzeugung realistischer Lenkkräfte basierend auf den tatsächlichen physikalischen Gesetzen und Eigenschaften, die die Lenkkräfte in einem Fahrzeug bestimmen. Diese Methode ist charakterisiert durch eine hohe Wiedergabegenauigkeit. Diese Technologie findet häufig Verwendung in Fahrsimulationen und SbW-Systemen (Balachandran & Gerdes, 2015; Chugh et al., 2020). Um den Prozess der Modellanpassung zu vereinfachen, entwickelten Mohellebi et al. (2009) eine modulare modellbasierte Lenkkraft-Feedbackmethode. Dadurch wird eine einfache Implementierung der Komponenten des Lenksystems ermöglicht, sowie das unabhängige Studium der Auswirkungen jedes Subsystems. Aufgrund der schwankenden Latenzen beim teleoperierten Fahren wird die Synchronisation des Feedbacks mit den tatsächlichen Fahrbedingungen allerdings erschwert, was die Kontrolle und das Fahrgefühl negativ beeinflussen kann. Um dieses Problem abzuschwächen, können Regelungsstrategien wie der Smith-Prädiktor verwendet werden, um die Auswirkungen von Latenzen im Regelungssystemen zu kompensieren (Guo et al., 2022).

Beim *Drehmomentkarten-basierten Lenkkraft-Feedback* wird das Verhältnis zwischen verschiedenen Eingangsparametern (wie Lenkwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Straßenbedingungen) und dem resultierenden Lenkdrehmoment beschrieben. Basierend auf diesen Drehmomentkarten können Lenkkräfte simuliert werden. Dabei findet dieses Modell Verwendung in Fahrsimulationen als auch in SbW-Systemen (Lee et al., 2020). Die einfache Struktur der Drehmomentkarten ermöglicht eine schnelle Berechnung des Lenkdrehmoments, was, im Gegensatz zum physikalischen, modularen Modell zu einer geringeren Latenz im Feedback führt. Da die Drehmomentkarten allerdings auf vordefinierten Beziehungen zwischen Eingangsparametern und Lenkdrehmomenten basieren, kommt es bei bestimmten komplexeren Vibrationen zu einem weniger realistischen Fahrgefühl, da diese Phänomene nicht vollständig erfasst werden können. Aufgrund dessen sind Verbesserungen von Nöten, um ein zuverlässiges Lenkfeedback zu gewährleisten (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Das *Lenkstrom-basierte Force Feedback* ist eine fortschrittliche Technologie, die ein realistisches und informatives Feedback an den Fahrer liefert. Dabei ist der Spannungswert, der durch den Lenkmotor fließt, proportional zur Kraft, die der Motor auf das Lenkrad ausübt. Eingesetzt wurde diese Technologie bereits in SbW-Fahrzeugen (Ba-Hai Nguyen & Jee-Hwan Ryu, 2009) als auch bei teleoperierten Fahrzeugen (Lin Zhao, 2023). Zhao et al. (2022) führten ein Frequenz- und Amplituden-Feedback-Modell ein, bei dem hochfrequente und amplitudenstarke Stromsignale als auch stochastische Straßenrückmeldungen wie Kopfsteinpflaster, an die Fahrer übermittelt werden. Durch dieses Modell wird ein realistischeres Gefühl für die Straßenbeschaffenheit ermöglicht. Jedoch stellt auch hier die Latenz bei der Signalübertragung eine

Herausforderung dar, da diese zu bemerkbaren Verzögerungen im Feedback für den Operator führt (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Die Lenkungeigenschaften unterscheiden sich je nach Zustand des Fahrzeugs und werden durch Hysterese oder Haftgrenzen der Reifen beeinflusst. Um dahingehend das Lenkgefühl im SbW-System zu verbessern, führten Jiang et al. (2019) ein *Adaptives Lenkkraft-Feedbackmodell* ein. Dabei setzten sie einen adaptiven Drehmomentregler ein, der auf einem neuronalen Netzwerk basiert, um die Fahrzeugdynamik zu approximieren und das Lenkmoment dynamisch anzupassen. Der Regler zielt darauf ab, die Leistung des Fahrer-Fahrzeug-Systems an ein Referenzmodell anzunähern, sodass das gewünschte Rückkopplungsmoment erzeugt wird, welches eine realistischere und komfortablere Lenkreaktion ermöglicht. Dabei adaptiert dieser kontinuierlich, um die Präzision der Rückmeldung zu verbessern (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Maschinelles Lernen bietet im Hinblick auf Lenkkraftrückmeldungsmodelle die Möglichkeit, die Rückmeldungen an den Fahrer dynamisch und präzise anzupassen. Van Ende et al. (2016) stellten dahingehend einen Ansatz vor, bei dem ein neuronales Netzwerk die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug modelliert, indem es die dynamischen Eigenschaften des Systems durch das Training mit umfangreichen Datensätzen lernt und die gewünschten Rückkopplungsmomente berechnet. Dabei ist es in der Lage nichtlineare Eigenschaften der Rückkopplungskraft zu simulieren. Basierend auf der Analyse der Sensordaten passt das System die Rückmeldung an den Fahrer an. Ein entscheidender Vorteil des maschinellen Lernens ist die Fähigkeit des neuronalen Netzwerks, kontinuierlich aus den neuen Daten zu lernen, die während der Fahrt gesammelt werden. Für die Anwendung des Modells im teleoperierten Fahren könnten die im realen Fahrzeug gesammelten Daten allerdings nicht direkt anwendbar sein, weshalb eine weitere Anpassung erforderlich wäre (Zhao, Nybacka, Rothhämel et al., 2024).

Eine tabellarische Zusammenfassung über die verschiedenen Technologien zur Erzeugung eines Lenkkraft-Feedbacks bietet Abbildung 25.

#### **4.1.3 Motion Cueing-Feedback**

Motion Cueing Feedback ist eine Technologie, die dem Fahrer ein realistisches Gefühl für die Fahrzeugbewegungen vermitteln soll, da diese schwer über Videoinformationen interpretierbar sind. Die Abwesenheit dieser immersiven Darstellung der Fahrzeugdynamik könnte zu Unsicherheiten bei der Steuerung des Fahrzeugs führen, insbesondere dem Abbremsen vor Objekten, was das Unfallrisiko besonders in städtischen Bereichen erhöhen könnte (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Eine Applika-

| Methode                               | Funktionsprinzip  | Vorteile  | Nachteile   |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Physikalisch/modular basiertes Modell | Basiert auf den physikalischen Eigenschaften des Lenksystems                        | Hohe Wiedergabegenauigkeit                          | Hohe Abhängigkeit von Modellgenauigkeit und Latenz  |
| Drehmomentkarten-basiertes Modell     | Beschreibt Verhältnis zwischen Eingangsparametern und resultierendem Lenkdrehmoment | Geringe Latenzanfälligkeit                          | komplexeren Vibrationen können nicht dargestellt werden                                   |
| Lenkmotorstrom-basiertes Modell       | Kraftrückmeldung proportional zum Spannungswert des Lenkmotors                      | Detaillierte Rückmeldung                            | Latenzabhängigkeit  |
| Adaptives Modell                      | Kontinuierliche Adaption basierend auf neuronalem Netzwerk                          | Realistischere und komfortablere Kraftrückmeldung   | Erhöhung der Komplexität  |
| Maschinelles Lernen-basiertes Modell  | Training des Modells durch umfangreiche Datensätze                                  | Bessere Darstellung nicht linearer Charakteristiken | Große Datensätze notwendig, Hürden bei Adaption von Datensätzen an Teleoperationsumgebung |

Abbildung 25 Übersicht über das Lenkkraft-Feedback in Anlehnung an Zhao, Nybacka, Rothhämel et al. (2024)

tion dieser, hauptsächlich in Fahrsimulationen eingesetzten Technologie, könnte eine potenzielle Lösung sein, Teleoperatoren ein Gefühl für die Beschleunigung zu vermitteln. Allgemein sind Translations- als auch Rotationsbewegungen möglich. Eine unzureichende translatorische Beschleunigung infolge der begrenzten Ausmaße kann über eine Neigungssteuerung kompensiert werden (Zhao, Nybacka, Drugge et al., 2024). Motion Cueing-Feedback lässt sich nach Zhao, Nybacka, Aramrattana et al. (2024) in zwei Kategorien einteilen: Washout-Filter-Methoden und auf modellprädiktiver Steuerung basierende Methoden. Im Folgenden werden diese Techniken erläutert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für das teleoperierte Fahren begutachtet.

#### *Washout-Filter-basierte Motion Cue Control*

Die Washout-Filter-basierte Motion Cue Control kann der angewandten Methode nach in eine klassische, optimale und adaptive Motion Cue Control gegliedert werden.

Die Klassische Washout-Filter-basierte Motion Cue Control ist eine weit verbreitete, einfache Methode zur Steuerung von Bewegungsplattformen in Fahrsimulatoren. Dabei transformieren die Washout-Filter die Bewegungen des Fahrzeuges so, dass sie innerhalb der begrenzten Bewegungsfreiheit der Plattform bleiben. Um die Leistung dieser Bewegungssimulatoren zu verbessern, führen S.-C. Wang und Fu (2004) einen prädikativen Ansatz ein, um die zukünftigen Bewegungen des Fahrzeugs vorherzusagen und die Bewegungsplattform entsprechend anzupassen. Ein zentrales Ziel der Methode ist es, die Bewegungen der Plattform für den Bediener unmerklich zu machen. Dies bedeutet, dass die Rückführung der Plattform zur Nullposition und andere Anpassungen so durchgeführt werden, dass der Bediener sie nicht wahrnimmt. Dieser Ansatz bewirkt eine effizientere Nutzung der Bewegungsplattform und ermöglicht somit günstigere und kleinere Remote-Driving-Stationen für die Teleoperation. Die

begrenzte Bewegungsfreiheit und Rückführungen zur Nullposition können hingegen dazu führen, dass Fahrzeugbewegungen nicht vollständig nachgeahmt werden oder die Wahrnehmung der beabsichtigten Beschleunigungen verzerren (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Die optimale Washout-Filter-basierte Motion Cue Control ist in der Lage realistischere und komfortablere Bewegungen zu simulieren, indem sie die menschliche Wahrnehmung berücksichtigt. Huang und Fu (2006) formulierten einen Ansatz basierend auf einem Modell des menschlichen vestibulären Systems, der darauf abzielt, die Empfindungsfehler des Piloten zu minimieren und die Effizienz der Bewegungsplattform zu erhöhen. Diese Methode bedarf allerdings einer größeren Plattform, was gegen die Präferenz kleiner Fahrsimulatoren in der Teleoperation spricht (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Eine mögliche Lösung für dieses Problem stellen fortschrittlichere Algorithmen wie genetische Algorithmen dar, um die Parameterabstimmung zu optimieren (Asadi et al., 2015).

Der adaptive Washout-Filter unterscheidet sich von klassischen und optimalen Washout-Filtern dadurch, dass er sich an die aktuellen Bedingungen anpasst, um eine realistischere Simulation zu ermöglichen. Anstelle fester Parameter passt der adaptive Filter seine Parameter dynamisch an die aktuellen Bewegungsanforderungen an. Dies geschieht infolge der „Continuous Steepest Descent Method“ – einer Optimierungstechnik, die verwendet wird, um die Parameter eines Systems kontinuierlich anzupassen, sodass das gewünschte Ziel erreicht wird (Murgovski, 2007). Aufgrund der Anpassungsfähigkeit des adaptiven Washout-Filters ist dieser für verschiedene Szenarien im Rahmen des teleoperierten Fahrens geeignet und erleichtert so die Adaption bei Anwendungen. Allerdings neigt der adaptive Washout-Filter dazu, konservativ zu sein, um sicherzustellen, dass die Plattform innerhalb ihrer physischen Grenzen bleibt, welches in einer suboptimalen Ausnutzung des Arbeitsbereichs resultieren kann.

#### *Modellprädiktive Steuerung-basierte Motion Cue Control*

Model predictive control (MPC) ist eine fortschrittliche Steuerungstechnik, die auf einem dynamischen Modell des Systems basiert. Der Vorteil des MPCs, im Vergleich zum Washout-Filter, liegt darin, mehrere Ziele gleichzeitig zu optimieren und so Problemstellungen, wie die physische Begrenzung der Simulatoren und die menschliche Wahrnehmung, in ein multivariates Optimierungsproblem zu verwandeln.

Augusto und Loureiro (2009) entwickelten und erprobten eine MPC-basierte Motion Cue Control an einem Fahrsimulator. Dabei formulierten sie eine Modellierung und Linearisierung des vestibulären Systems und berücksichtigten die physikalischen Begrenzungen der Bewegungsplattform, indem diese Einschränkungen direkt in das

| Methoden                       | Vorteile   | Nachteile  |
|--------------------------------|--|--|
| Classical washout filter (CWF) | einfach zu implementieren, robust gegenüber Modellunsicherheiten, ressourcenschonend | Unbeabsichtigte Beschleunigungsverzerrung                  |
| Optimal washout filter (OWF)   | Anpassung an menschliche Wahrnehmung   | Großer physischer Arbeitsbereich                           |
| Adaptive washout filter (AWF)  | Dynamische Anpassung an Bewegungsanforderungen                                       | Suboptimale Ausnutzung des Arbeitsbereichs                 |
| Model predictive control (MPC) | Effiziente Nutzung des Arbeitsbereichs, realistisches Fahrgefühl                     | Hoher Rechenaufwand, robuste Echtzeitumgebung erforderlich |

Abbildung 26 Übersicht über die Motion Cue Control in Anlehnung an Zhao, Nybacka, Aramrattana et al. (2024)

Optimierungsproblem integriert wurden. Dies geschieht durch die Definition von Beschränkungen für die Plattformbewegungen, wie z.B. maximale Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Diese Beschränkungen werden in die mathematischen Modelle und die Optimierungsalgorithmen eingebunden, sodass die berechneten Steuerungsbefehle stets innerhalb der physikalischen Grenzen der Plattform bleiben. Dadurch ist eine effizientere Nutzung des Simulatorraums möglich und resultiert in einer realistischeren Bewegungsempfindung für den Operator.

Zudem etablierte Maran (2013) weitere Maßnahmen, die darauf abzielten, die Bewegungen der Plattform so zu steuern, dass die natürlichen Bewegungen des menschlichen Körpers besser nachgeahmt werden, da übermäßige oder unnatürliche Bewegungen infolge der physischen Begrenzung des Arbeitsbereichs oft die Hauptursache für eine Bewegungskrankheit sind. Grundsätzlich bietet MPC im Kontext des teleoperierten Fahrens erhebliche Vorteile in Bezug auf die Handhabung von Plattformgrenzen und der Reduzierung von Bewegungskrankheit und somit bei der Darstellung eines realistischeren Fahrgefühls. Allerdings stellt der hohe Rechenaufwand eine potenzielle Herausforderung dar, da die erfolgenden Berechnungen und Anpassungen in Echtzeit erfolgen müssen und eine Verzögerung ein Sicherheitsrisiko darstellen könnte (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Abbildung 26 bietet eine Übersicht über die vorgestellten Methoden zur Erzeugung eines Bewegungsfeedbacks.

#### 4.1.4 Vibrations- und Audiofeedback

Beim teleoperierten Fahren treten vorrangig zwei Probleme auf: die durch den Menschen bedingte Bewegungskrankheit und eine eingeschränkte Wahrnehmung der Umgebung des Fahrzeugs. Es wurden zahlreiche Studien durchgeführt, um zu untersuchen, wie effektiv Vibrationen dabei sind, Symptome der Bewegungskrankheit zu reduzieren. Lucas et al. (2020) haben bspw. die Wirkung von Sitzvibrationen auf die Bewegungskrankheit beim teleoperierten Fahren erforscht und festgestellt, dass bestimmte Vibrationen im Sitz tatsächlich dazu beitragen können, diese Symptome zu mildern. Dazu zählen zum einen Propriozeptive Vibrationen. Diese zielen speziell darauf ab, den propriozeptiven Sinn zu beeinflussen, der für die Wahrnehmung der Position und Bewegung des Körpers im Raum verantwortlich ist. Zum anderen haben realistische Vibrationen, die die tatsächlichen Straßenvibrationen nachahmen, ebenfalls eine positive Wirkung, indem sie die Immersion erhöhen. Auch nach der Theorie von Reason (1978) kann diese Reduzierung des sensorischen Konflikts zwischen den erwarteten und tatsächlichen sensorischen Informationen die Symptome der Bewegungskrankheit schwächen. Dabei erwiesen sich realistische Vibrationen im Vergleich zu propriozeptiven Vibrationen grundsätzlich als wirksamer bei der Reduzierung von Symptomen.

Neben dem Vibrationsfeedback lässt sich auch akustisches Feedback einsetzen, um Informationen über das Fahrzeug während des teleoperierten Fahrens zu übermitteln (Vasilijevic et al., 2018; Zhao, Nybacka, Rothhämel & Drugge, 2023). Vasilijevic et al. (2018) untersuchen den Einsatz eines räumlichen akustischen Führungssystems (im Englischen Spatial Auditory Guidance System, kurz AGS) für das Fernsteuern von unbemannten Fahrzeugen - speziell für die Trajektorienverfolgung. Dabei verdeutlichen die akustischen Signale die relative Richtung und die Entfernung zum Waypoint, um so eine intuitive und direkte Rückmeldung über die Position und die Bewegung des Fahrzeugs zu vermitteln. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Fähigkeit zur Pfadverfolgung um 35 Prozent verbessert wird und Verfolgungsfehler um fast 70 Prozent bei nur 14 Prozent erhöhtem Steueraufwand verringert werden. Weiterhin zeigt die Studie von Larsson et al. (2023), dass akustische Signale für Fernbediener nützlich sein können, um wichtige Informationen über die Fernumgebung für einen sicheren und effizienten Fahrzeugbetrieb zu übermitteln.

#### 4.1.5 Neuartige Benutzer-Fahrzeug-Schnittstellen

Neben den herkömmlichen Schnittstellen wie Lenkrad oder Gas- und Bremspedal für das Teleoperieren von Fahrzeugen, werden auch innovative Steuergeräte entwickelt, um die Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung zu verbessern. Nguyen und Ryu (2010)

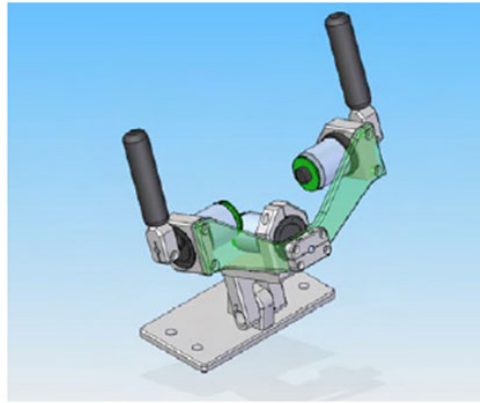


Abbildung 27 Haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden (Nguyen & Ryu, 2010)

haben eine haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden vorgestellt (siehe Abbildung 27). Diese ermöglicht die Kontrolle der Lenkradbewegungen über ein zentrales Drehgelenk. Die rechten und linken Griffe der Schnittstelle dienen dazu, Kraftfeedback zu reproduzieren, das proportional zum Fahrzeugstatus ist (Roll-, Gier- und Nickwinkel). Eine Darstellung der Geschwindigkeit, sowie der Kurveneffekte und Straßenzustände ist durch die variable Anpassung des Kraftfeedbacks möglich. So kann, neben der Funktion der Steuerung des Fahrzeugs, auch ein Gefühl für die Umgebung und den Zustand des Fahrzeugs vermittelt werden. Weiterhin ist eine Anpassung an verschiedene Fahrzeugtypen möglich.

Auch Tyagi und Mascaro (2018) haben eine haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden entwickelt (siehe Abbildung 28), die darauf abzielt, die Teleoperation von omnidirektionalen Radrobotern zu verbessern, indem dem menschlichen Bediener ein omnidirektionales Kraftfeedback geboten wird. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die implementierte Kraftfeedbackstrategie die Anzahl der Kollisionen signifikant verringert und das Rotationsfeedback zu glatteren Fahrtrajektorien führt.

## 4.2 Latenz

Trotz der Nutzung von 5G-Netzwerken und Bandbreitenkontrollmethoden kommt es beim teleoperierten Fahren zu Latenzen (Neumeier et al., 2022). Dabei gibt es zwei Hauptansätze, um die daraus resultierenden negativen Auswirkungen zu verringern: die Videovorhersage und -korrektur sowie die Fahrzeugzustandsvorhersage.

Bei der Videovorhersage und -korrektur werden zukünftige Bilder innerhalb des Videostreams basierend auf aktuellen Daten vorhergesagt und Fehlerkorrekturmechanismen angewandt, sodass ein klares und vollständiges Bild gewährleistet werden kann. Die Fahrzeugzustandsvorhersage bezieht sich auf die Nutzung von Datenanalyse, ma-

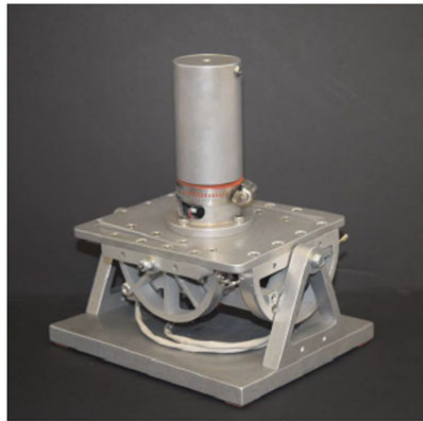


Abbildung 28 Haptische Schnittstelle mit drei Freiheitsgraden (Tyagi & Mascaro, 2018)

schinellem Lernen und anderen fortschrittlichen Technologien, um den zukünftigen Zustand eines Fahrzeugs vorherzusagen. Ziel ist es, die Gesamtlatenz des Systems zu minimieren (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

#### 4.2.1 Videovorhersage und -Korrektur

Zur Vorhersage der Fahrzeugtrajektorie, formulieren Ren et al. (2016) eine Methode basierend auf einem dynamischen Modell, welches die physikalischen Eigenschaften und Bewegungsdynamiken des Fahrzeugs berücksichtigt. Dieses Modell beruht auf der Verwendung von Lidar-Daten und einer Video-Kamera, um die Umgebung des Fahrzeugs zu erfassen und Daten für die Trajektorienvorhersage zu liefern. Die Trajektorie wird dann mithilfe der berechneten Beschleunigung (auf Basis der aktuellen Geschwindigkeit sowie die Gas-/Bremspedalstellung), dem Lenkradwinkel und dem Fahrzeugmodell für diskrete Punkte (linkes/rechtes Rad; Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems) vorhergesagt. So kann selbst bei einer Verzögerung in der Übertragung der Steuerbefehle die bereits berechnete Trajektorie verfolgt werden, da diese auf den letzten bekannten Eingaben basiert. Die Echtzeitvisualisierung ermöglicht dem Operator dann eine aktuelle und genaue Darstellung der Fahrzeugumgebung. Da dieser Ansatz zur Vorhersage der Fahrzeugtrajektorie jedoch nur auf einer Reihe diskreter Punkte basiert, wird die genaue Position des Fahrzeugs (unter Einbezug der Verzögerungszeit) nicht berücksichtigt.

Weiterhin stellten Forscher von der BMW Group und der Technischen Universität München (vgl. (Graf et al., 2020)) ein Modell zur Vorhersage der Fahrzeugkurvenbahn vor, bei der die Eingaben des Operators in den Regelkreis integriert werden. Dadurch kann die Vorhersagegenauigkeit erhöht werden, da es die Verzögerungen zwischen Eingabe des Operators und Reaktion des Fahrzeugs berücksichtigt. Dieses Modell



ist allerdings auf konstante Latenzen ausgerichtet. Daher ist die Genauigkeit der Vorhersage stark von der angenommenen Latenz abhängig.

Um dieses Problem variabler Latenzen anzugehen nutzen Prakash et al. (2020) den Ansatz der perspektivischen Vorhersageanzeige, um die zukünftige Ansicht des Fahrzeugs zu simulieren. Dabei wird zunächst die Position des Fahrzeugs unter Berücksichtigung seiner Geschwindigkeit und der aktuellen Datenübertragungsverzögerungen vorhergesagt. Anschließend wird eine perspektivische Bildtransformation durchgeführt, um die neue Perspektive des Sichtfelds des Fahrzeugs entsprechend der vorhergesagten Position zu erhalten. Hier wird jedes Objekt vor dem Fahrzeug unter Berücksichtigung seiner Entfernung von der Kamera angepasst. Dabei ist die Wirksamkeit dieser Technik proportional zur Kürze der vorherzusagenden Distanz. So liefert dieser Ansatz insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten (unter 20km/h) und kleineren Latenzen (unter 400ms) hinreichende Ergebnisse.

Einen anderen Ansatz wählten Sato et al. (2021). Sie stellten eine Methode zur Visualisierung der Echtzeit-Latenzen vor, die die latenzbedingte Differenz zwischen tatsächlicher und vom Fahrzeug übertragener Position in Form einer Fahrzeugtrajektorie darstellt. So repräsentiert die Spitze der Fahrzeugtrajektorie die tatsächliche Position des Fahrzeugs, wodurch, insbesondere bei hohen Latenzen, eine präzisere Steuerung des Fahrzeugs ermöglicht wird.

Brudnak (2016) stellten einen proaktiven Ansatz zur Minderung hoher Latenzzeiten vor, in dem ein Feed-Forward-Vorhersagemodell die vom Fahrzeug gesendeten visuellen Daten dahingehend manipuliert, eine bestmögliche Schätzung dessen zu rendern, was der Operator ohne Verzögerung sehen würde. Dabei basiert das Modell auf der Annahme, die aktuelle Ansicht aus einer vergangenen Ansicht zu prognostizieren und so eine unmittelbare Schätzung zu formulieren, wie das Fahrzeug auf die eingegebenen Befehle reagieren wird. Die Vorteile dieses Ansatzes zeigen sich besonders in der Verringerung von Pfadabweichungen und der Reduzierung von Richtungsfehlern.

Weiterhin formulierten Prakash, Vignati, Vignarca et al. (2023) einen Ansatz basierend auf der bereits erwähnten Technik der Perspektivprojektion in Kombination mit dem Einsatz von Smith-Prädiktoren, um die negativen Auswirkungen der Zeitverzögerungen zu mildern. Dies wurde erreicht, indem die Verzögerung aus der Regelungsschleife entfernt und das System in ein System mit nur verzögerter Ausgabe verwandelt wurde. Dadurch konnte eine Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich der Bahnabweichungen und Oszillationen erreicht werden.

Abbildung 29 bietet einen Überblick über die vorgestellten Methoden zur Videovorhersage und -korrektur.

| Herangehensweise               | Methode  | Vorteile  | Nachteile  |
|--------------------------------|--|---|--|
| Videovorhersage und -korrektur | Trajektorienvorhersage basierend auf dynamischen Fahrzeugmodell (Ren et al. 2016)            | Vorhersage der Fahrzeugtrajektorie                      | Einfluss der Latenz wird nicht berücksichtigt                |
|                                | Trajektorienvorhersage durch Berücksichtigung der Operatoreingaben (Graf et al. 2020)        | Hohe Vorhersagegenauigkeit                              | Berücksichtigt nur konstante Latenzen                        |
|                                | Vorhersage der Fahrzeugposition und perspektivische Bildtransformation (Prakash et al. 2020) | Visualisierung der Fahrzeugumgebung in Echtzeit         | Geringere Genauigkeiten bei hohen Geschwindigkeiten/Latenzen |
|                                | Darstellung der latenzbedingten Positionsänderungen (Sato et al. 2021)                       | Veranschaulicht latenzbedingte unsichtbare Bewegungen   | Erhöht die Komplexität in der Positionswahrnehmung           |
|                                | Verwendung eines Smith-Prädiktors zur Perspektivprojektion (Prakash et al. 2023b)            | Ermöglicht ein Gefühl der Fahrzeugsteuerung in Echtzeit | Abhängig von der Modellgenauigkeit des Fahrzeugmodells       |

Abbildung 29 Übersicht über die Videovorhersage und -korrektur in Anlehnung an Zhao, Nybacka, Aramrattana et al. (2024)

#### 4.2.2 Fahrzeugzustandsvorhersage

Zwecks genauer Vorhersage zukünftiger Fahrzeugzustände stellen Tandon et al. (2014) ein Beobachter-basiertes Framework vor, bei dem die internen Zustände des Systems, basierend auf dem Prinzip der Sliding Mode Control, geschätzt werden, ohne dabei auf ein detailliertes Modell angewiesen zu sein. Dadurch kann die Stabilität und Genauigkeit von Hardware-in-the-Loop-Simulationen verbessert werden. Die Integration in einem Feedback-Loop (Rückkopplungsschleife) ermöglicht die Anpassung der Vorhersagen auf Basis der aktuellen Eingaben. Diese Methode wurde an einem Massen-Feder-Dämpfer-System und einem Fahrzeug-Motor-Fahrer-System getestet. Dabei konnte eine Verbesserung der Simulationsgenauigkeit um bis zu 33 Prozent festgestellt werden.

Ge et al. (2015) integrieren diesen modellfreien Prädiktor in die Architektur teleoperierter Fahrzeuge um die Kommunikationsverzögerungen während des teleoperierten Fahrens zu mindern und so die Fahrleistung zu verbessern. Infolgedessen benötigt das System kein Wissen über die Systemdynamik und basiert demnach lediglich auf den Fahrerinputs, den Fahrzeugoutputs sowie der Zeitverzögerung. Eine Bewertung des Einflusses der Vorhersagen in Bezug auf die Kompensation der Verzögerungen im Rahmen der Studie ergab eine Steigerung der Fahrleistung von über 90 Prozent im Vergleich zu Fällen ohne Vorhersagen.

Weiterhin verwendeten Y. Zheng et al. (2016) den modellfreien Prädiktor um diesen erstmals in einer Human-in-the-Loop-Simulation zu testen, um dessen Leistung unter Bedingungen zu evaluieren, die echte Teleoperationsszenarien nachahmen und so wertvolle Einblicke in die praktische Anwendbarkeit und Effektivität des Systems zu

sammeln. Die Ergebnisse der Studie weisen auf eine Reduzierung der Spurabweichung hin sowie eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit.

H. Zhang et al. (2018) präsentierten einen neuen Algorithmus, welcher speziell auf die Kompensation von Controller Area Network (CAN)-Bus induzierten Verzögerungen ausgerichtet ist. Dieser basiert auf einem Smith-Prädiktor, welcher zukünftige Zustände des Systems auf Grundlage der erfassten/verarbeiteten Echtzeitdaten im CAN-Bus vorhersagt. Mit der Implementation eines Feedback-Kontrollgesetzes werden die vom Prädiktor nicht verzögerten Zustände verwendet, um ein Feedback-Signal zu konstruieren, damit die Fahrzeugsteuerung so angepasst werden kann, als ob keine Verzögerungen vorhanden wären. Dabei ist die Leistung des Smith-Prädiktors stark von der Genauigkeit der verwendeten Modelle abhängig.

Den Ansatz der modellprädikativen Regelung zur Vorhersage der Fahrzeugposition und damit einen proaktiven Ansatz zur Kompensation von Übertragungslatenzen, nutzten Nasry et al. (2013), da er zukünftige Zustände vorhersagt und die notwendigen Daten im Voraus bereitstellt. Der Algorithmus konstruiert die Umgebung mit einem vordefinierten Zeitversatz, indem Lidar-Daten genutzt werden, um Hindernisse relativ zur zukünftigen Position des Fahrzeugs darzustellen. Dies bedeutet, dass die Umgebung vor der aktuellen Zeit vorausberechnet wird, um Verzögerungen in der Datenübertragung zu kompensieren. Dadurch kann eine sichere und effizientere Navigation gewährleistet werden.

Prakash, Vignati und Sabbioni (2023) hingegen stellt einen Ansatz unter Verwendung der Successive Reference Pose Tracking (SRPT)-Methode vor. Dieser basiert darauf, dass das ferngesteuerte Fahrzeug Referenzposten erhält, anstelle der direkten Lenkbefehle, umso die Auswirkungen von Latenzen zu mindern. Diese Referenzposten werden vom Bediener erstellt, indem er die laterale Position des Fahrzeugs in einer erweiterten Realitätsumgebung steuert. Dabei wird nicht nur die aktuelle Position, sondern auch die zukünftige gewünschte Position und Orientierung des Fahrzeugs berücksichtigt und infolgedessen kann ebenso die Fahrzeuggeschwindigkeit dynamisch angepasst werden. Da die SRPT-Methode auch die kontinuierliche Aktualisierung der Referenzposten ermöglicht, verbessert diese die Stabilität und die Leistung der Referenzverfolgung erheblich, wobei Netzwerkverzögerungen, aufgrund der genannten Besonderheiten, kaum Auswirkungen auf die Pfadverfolgung haben.

Abbildung 30 bietet einen Überblick über die vorgestellten Ansätze zur Fahrzeugzustandsvorhersage.

| Herangehensweise                | Methode   | Vorteile   | Nachteile  |
|---------------------------------|---|--|--|
| Fahrzeugzustands-<br>vorhersage | Beobachter-basiertes Framework<br>(Tandon et al. 2014; Ge et al. 2015)                        | Nicht auf detailliertes Fahrzeugmodell<br>angewiesen                   | Überreaktion bei plötzlicher Änderung des<br>Eingangssignals |
|                                 | Smith-Prädiktor zur Kompensation CAN-<br>Bus induzierter Verzögerungen<br>(Zhang et al. 2018) | Hohe Vorhersagegenauigkeit   | Stark von Modellgenauigkeit abhängig                         |
|                                 | Modellprädikativer Ansatz<br>(Nasry et al. 2013)  | Kompensation von niedrigen als auch<br>hohen Verzögerungen             | Hoher Rechenaufwand  |
|                                 | SRPT-Methode<br>(Prakash et al. 2023a)  | Verbessert die Stabilität/Leistung der<br>Referenzverfolgung erheblich | Hohe Komplexität   |

Abbildung 30 Übersicht über die Fahrzeugzustandsvorhersage in Anlehnung an Zhao, Nybacka, Aramrattana et al. (2024)

### 4.2.3 Haptisch-Basierte Unterstützende Steuerungsstrategien

Beim Remote Driving kann es infolge von Übertragungsverzögerungen und einer eingeschränkten Sichtqualität zum Verlust von Informationen oder einer eingeschränkten Situationswahrnehmung kommen. Diese Herausforderungen können die Fähigkeit des Fahrers beeinträchtigen, das Fahrzeug sicher und effizient zu steuern. Eine vielversprechende Lösung für dieses Problem ist die Implementierung von haptischen Rückmeldungen zur Unterstützung der Fahrzeugsteuerung.

Fennel et al. (2021) beschreiben einen Ansatz zur Erzeugung von Pfaden mittels einer haptischen Schnittstelle. In diesem wird dem Operator ermöglicht einen Pfad zu erstellen. Dabei erfolgt ein haptisches Feedback in Form einer Führungskraft, die sicherstellt, dass die vom Operator erstellten Pfade den kinematischen und dynamischen Einschränkungen des Fahrzeugs entsprechen, ohne dabei die Fähigkeit zur unabhängigen Entscheidungsfindung zu beeinträchtigen. Die Experimente zeigten, dass der Führungsalgorithmus die Fahrbarkeit der vom Operator erstellten Pfade signifikant erhöhte und somit auch in Szenarien verwendet werden könne, die eine hohe Genauigkeit erfordern. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass erfahrene Operatoren nur in geringen Maßen von der Führungskraft beeinflusst wurden, was darauf hindeutet, dass die Methode die Entscheidungsfähigkeit und Unabhängigkeit der Benutzer weitgehend unbeeinträchtigt lässt.

Zudem bewerteten Hacinecipoglu et al. (2013) den Einfluss von haptischem Feedback bei der Teleoperation in Szenarien zur Hindernisvermeidung. In dieser Studie berechnet ein Algorithmus, auf Basis der Umgebungsinformationen des Fahrzeugs, einen Pfad, welcher um die bevorstehenden Hindernisse herumführt. Dieser wird dann verwendet, um den dafür notwendigen Lenkwinkel zu berechnen, der dann über das haptische Feedback an den Operator übermittelt wird. Dabei hat der Operator immer die Möglichkeit, diese Kräfte zu überwinden und einen anderen Pfad zu wählen.

Infolge dieser intuitiveren Steuerung konnte im Rahmen der Studie die Arbeitsbelastung der Operatoren reduziert werden. Ebenso verringerte sich die Anzahl der Fahrfehler als auch die Bearbeitungszeit.

Le et al. (2016) verwendeten eine Technik des künstlichen Potenzialfeldes um die Kollisionsvermeidung durch haptische Rückmeldungen zu unterstützen. Dieser Ansatz ermöglicht die Modellierung des potenziellen Risikos stationärer und beweglicher Hindernisse. Der daraus resultierende Risikovermeidungsvektor bildet die Grundlage für die haptische Rückmeldung am Joystick. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das vorgeschlagene haptische Steuerungssystem die Leistung des Fahrers verbessert, indem es die Rate der Hindernisberührungen um 62 Prozent reduziert.

Ein neuartiges haptisches Assistenzsystem entwickelten Hosseini et al. (2016). Dieser Ansatz basiert auf einem zweistufigen Vorhersageprozess. Die erste Stufe kompensiert die Kommunikationszeitverzögerung, indem sie die aktuellen Zustände des ferngesteuerten Fahrzeugs sowie anderer dynamischer Objekte in der Umgebung vorhersagt. In der zweiten Stufe werden potenzielle Seitenkollisionen vorhergesagt, auf dessen Grundlage dann ein haptisches Feedback am Lenkrad des Teleoperators erzeugt wird. Dadurch kann eine generische Unterstützung des menschlichen Operators gewährleistet werden, ohne dass die Notwendigkeit spezifischer Informationen über die Umgebung besteht. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Verwendung dieses haptischen Systems zu einer Verringerung der Lenkradumdrehungsrate führt und damit zu einer Reduzierung des Lenkaufwands für den Operator. Auch konnte eine signifikante Verringerung der Anforderungen an den Operator festgestellt werden – anhand von objektiven als auch subjektiven Parametern.

Casqueiro et al. (2016) evaluierten verschiedene Typen des haptischen Feedbacks, darunter Vibrations-, Kraft- als auch Steifigkeitsfeedback. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Vibrationsfeedback am effektivsten Informationen über die Richtung des Hindernisses vermitteln kann. Auch führte diese Form der Rückmeldung zur geringsten Arbeitsbelastung seitens der Operatoren.

Sungjun Park et al. (2010) stellten eine Ansatz des energiebasierten Verfahrens zur Steuerung von teleoperierten Fahrzeugen in konstant zeitverzögerten Umgebungen vor. Dies dient dem Zweck, Geschwindigkeitsunterschiede aufgrund der latenzbedingten Differenz zwischen tatsächlicher und beabsichtigter Geschwindigkeit, sensibel wahrzunehmen zu können und gleichzeitig die Interaktionsstabilität zu gewährleisten. Dabei erfolgt die Kraftreflexion auf die Pedalerie auf Basis dieser Geschwindigkeitsdifferenz, sodass der Operator in der Lage ist diese Differenz durch eine Änderung der Rückmeldekraft wahrzunehmen. Die Ergebnisse des Experiments im Kontext dieser Studie zeigen, dass die Operatoren die Änderungen in den Geschwindigkeiten klar und

deutlich wahrnehmen konnten und das System eine präzisere und stabilere Steuerung der Fahrzeuge ermöglichen konnte.

## 5 Nachhaltigkeitsaspekt der Teleoperation

Trotz der Relevanz des Themas der Nachhaltigkeit in der heutigen Zeit gibt es nur wenige umfassende Quellen, die sich mit den nachhaltigen Aspekten der Teleoperation auseinandersetzen, was eine tiefere Untersuchung und Diskussion in diesem Bereich erschwert. Dennoch werden im Folgenden einige Punkte genannt, die einen Einfluss auf den ökologischen Aspekt von Nachhaltigkeit haben.

Zum einen bietet die durch die Teleoperation ermöglichte geteilte Mobilität vielfältige Möglichkeiten, den Verkehr effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten. Waymo-Fahrzeuge tragen beispielsweise dazu bei, mehr Menschen mit dem öffentlichen Nahverkehrssystem zu verbinden, was nicht nur die Lücke der letzten Meile schließt, sondern auch Staus reduziert (Waymo, 2023). Durch die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen und eine effizientere Auslastung der Fahrzeugflotte kann zudem die Gesamtzahl der benötigten Fahrzeuge reduziert werden, was Ressourcen bei der Herstellung und Wartung spart (Óscar Silva et al., 2022). Außerdem liefern bestellbare Elektrofahrzeuge, die 95 Prozent der Zeit nicht geparkt sind, deutlich mehr emissionsfreie Kilometer pro Fahrzeug als persönliche Fahrzeuge (Waymo, 2023). Der Einsatz von Teleoperation fördert zudem die Nutzung elektrisch betriebener Fahrzeuge und bietet dadurch einen Anreiz zur Nutzung nachhaltiger Energiequellen (Henriksson & Rehnmark, 2023).

Durch das Entfernen der Kabine und des Bedieners aus dem Fahrzeug kann auch das Gewicht signifikant reduziert werden, was den Energieverbrauch senkt und eine bessere Gewichtsverteilung zwischen den Achsen ermöglicht (Henriksson & Rehnmark, 2023; Lundbäck, 2022). Weiterhin können teleoperierte Fahrzeuge nicht nur schneller auf Notfälle reagieren und so die Auswirkungen von Unfällen und Pannen minimieren (Saparia et al., 2021), sondern auch durch präventive Wartung und optimierte Nutzung eine längere Lebensdauer haben, was den Bedarf an Neuproduktionen und damit den Ressourcenverbrauch verringert (Lundbäck, 2022).

Die Teleoperation ermöglicht außerdem, dass Dispositionsfahrten teilweise entfallen, die oft mehrere hundert Kilometer umfassen und daher eine erhebliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedeutet (Lundbäck, 2022). Ebenso können Operatoren näher am Wohnort arbeiten als traditionelle Fahrer, wodurch sie ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck weiter reduzieren können (Marquez-Barja et al., 2021).

## 6 Chancen der Teleoperation

Die Teleoperation bietet diverse Vorteile in Bezug auf das autonome Fahren. Der größte Nutzen der Teleoperation liegt in ihrer Fähigkeit, autonome Fahrzeuge in kritischen oder unvorhersehbaren Situationen zu unterstützen, wodurch die Sicherheit und Effizienz dieser Technologien erheblich verbessert wird. Durch die Teleoperation können menschliche Operatoren eingreifen, wenn das Fahrzeug auf Szenarien trifft, die außerhalb der programmierten Fähigkeiten liegen, da es praktisch unmöglich ist, die Entscheidungsalgorithmen der autonomen Fahrzeuge für alle möglichen Fahrszenarien zu trainieren. Dies erhöht nicht nur die Zuverlässigkeit autonomer Fahrzeuge, indem es die Lücken in ihrer autonomen Entscheidungsfindung überbrückt, sondern stärkt auch das Vertrauen der Öffentlichkeit in diese Technologie. Teleoperation ermöglicht eine schrittweise Integration autonomer Fahrzeuge in den Alltag, indem sie eine zusätzliche Sicherheitsebene bietet und gleichzeitig den Weg für vollständige Autonomie ebnet (Lu et al., 2022).

So bietet die Entwicklung von Teleoperationskonzepten und deren Anwendung in autonomen Fahrzeugen ebenfalls eine innovative Lösung, um die Grenzen der aktuellen automatisierten Fahrsysteme kontinuierlich zu verschieben. Selbst bei autonomen Fahrzeugen der Stufe 4 ist ein Teleoperator noch von Nutzen, da dieser das Fahrzeug außerhalb der ODD steuern kann und so den spezifischen Betriebsbereich des Fahrzeugs erweitert. Dies ist insbesondere bei unerwarteten Umgebungssituationen von Bedeutung, bspw. infolge plötzlicher Änderungen der Wetterbedingungen. Des Weiteren benötigen teleoperierte Fahrzeuge, im Vergleich zu vollautomatisierten Systemen, insbesondere bei Teleoperationskonzepten des Remote Driving, weniger und qualitativ einfachere Sensoren sowie weniger komplexe Algorithmen, da der menschliche Teleoperator die Umgebung über Live-Videoaufnahmen wahrnimmt und entsprechend steuert (T. Zhang, 2020).

Auch eröffnet die Teleoperation die Möglichkeit für neue Formen der Dienstleistung, die mit herkömmlichen oder selbstfahrenden Autos nicht realisierbar wären. Dazu gehören unter anderem teleoperierte Taxen, das Fern-Valet-Parken, ein Tele-Chauffeur-Service sowie die teleoperierte Lieferung von Waren (T. Zhang, 2020). Dies könnte die Art und Weise, wie Autos aktuell genutzt und geteilt werden, grundlegend verändern. Diese Dienste verwenden die Anwesenheit eines Teleoperators, um mit anderen Verkehrsteilnehmern wie der Polizei bei Verkehrskontrollen oder dem Servicepersonal zu interagieren. Bei vollautomatisierten Fahrzeugen stellt diese Form der Interaktion mit der Umwelt eine Herausforderung dar (T. Zhang, 2020).



Weiterhin können Teleoperatoren, sofern der Automatisierungsgrad des automatisierten Systems eine Teleoperation im Sinne der Remote Assistance ermöglicht, eine größere Anzahl von Fahrzeugen effizient steuern, da nicht alle Fahrzeuge zur gleichen Zeit gesteuert werden müssen (T. Zhang, 2020). Dies ist besonders im Taxigewerbe relevant, wo Fahrzeuge oft ohne Passagiere unterwegs sind. So haben bspw. Taxifahrer in New York 40 Prozent der Zeit keine Passagiere im Fahrzeug (Schaller Consulting, 2006).

Ein weiterer potenzieller Vorteil der Teleoperation könnte darin liegen, die Kosten durch die Auslagerung von Arbeitsprozessen in Ländern mit niedrigeren Arbeitskosten zu senken. So könnten Fernfahrten im Logistikprozess durch weltweit verteilte Teleoperatoren ausgeführt werden (Noah Goodall, 2020).

Außerdem kommt es auf Baustellen trotz vielfältiger Sicherheitsmaßnahmen nach wie vor zu tödlichen Unfällen. Dahingehend kann die Teleoperation genutzt werden, um das Verletzungsrisiko für Arbeitende in gefährlichen Umgebungen zu senken, indem der Bediener von der Gefahrenzone physisch getrennt werden kann (Jin Sol Lee et al., 2022).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Teleoperation nicht nur eine Brücke zur vollständigen Autonomie von Fahrzeugen bildet, sondern auch eine Vielzahl von praktischen Anwendungen und Vorteilen bietet, die weit über die bloße Unterstützung autonomer Fahrzeuge hinausgehen. Sie erweitert die Funktionalität und den Einsatzbereich von Fahrzeugen, verbessert die Sicherheit sowohl auf den Straßen als auch in gefährlichen Arbeitsumgebungen und bietet innovative Dienstleistungen, die das Potenzial haben, unsere Mobilitäts- und Logistiksysteme grundlegend zu verändern.

## 7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war es, die Herausforderungen und Chancen der Te-  
leoperation im Hinblick auf die Mensch-Maschinen-Interaktion und dem Aspekt der  
Nachhaltigkeit zu beleuchten. Dazu bietet diese Arbeit einen umfassenden Überblick  
über den theoretischen Hintergrund, diskutiert aktuelle Herausforderungen wie Si-  
tuationsbewusstsein und Latenzzeiten und schlägt mögliche Lösungen vor.

Beginnend mit dem theoretischen Hintergrund wurde sich mit der industrielle Ent-  
wicklung auseinandergesetzt. Diese hat seit dem 18. Jahrhundert mehrere signifikante  
Revolutionen erlebt, die jeweils durch bahnbrechende technologische Innovationen  
ausgelöst wurden (Bendig et al., 2021). Diese Revolutionen haben die Art und Weise,  
wie Produkte hergestellt, Arbeitskräfte eingesetzt und Ressourcen genutzt werden,  
grundlegend verändert. Mit dem Aufkommen der Industrie 5.0 stehen wir nun am  
Beginn einer neuen Ära, die nicht nur technologische Fortschritte, sondern auch eine  
Rückbesinnung auf den Menschen in den Mittelpunkt stellt (Günther et al., 2022;  
Kong et al., 2019).

Trotz der Fortschritte in der Automatisierung und Vernetzung bleibt der Mensch ein  
unverzichtbarer Bestandteil der Produktionsprozesse (Grosse et al., 2023; Kadir et  
al., 2019). Die Industrie 4.0 hat jedoch Herausforderungen wie den Fachkräftemangel,  
erhöhte physische und psychische Belastungen sowie eine verringerte Entscheidungs-  
freiheit für weniger qualifiziertes Personal mit sich gebracht (Günther et al., 2022).  
Zudem wurde die Berücksichtigung menschlicher Faktoren, trotz ihrer offensichtlichen  
Wichtigkeit, oft vernachlässigt, was zu suboptimalen Systemen führte (Neu-  
mann et al., 2021). Industrie 5.0 erweitert die Prinzipien der Industrie 4.0, indem sie  
einen stärker kollaborativen, menschenzentrierten und ressourceneffizienten Ansatz  
verfolgt (Xu et al., 2021). Dieser Ansatz betont die Notwendigkeit, die Technologien  
der Industrie 4.0 weiterzuführen und zu optimieren, indem er die menschliche Kom-  
ponente stärker in den Vordergrund rückt (Demir et al., 2019; Kong et al., 2019).  
Die Hauptziele sind die Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Arbeitern und  
Maschinen, die Anpassungsfähigkeit der Produktionsprozesse und die Minimierung  
der Umweltauswirkungen (Ivanov, 2023).

Des Weiteren wurden die Herausforderungen bei der Implementierung der Industrie  
5.0 dargelegt, darunter die Integration neuer Technologien in bestehende Systeme,  
hohe Investitionskosten und die Notwendigkeit, das Wissen und die Akzeptanz der  
Mitarbeiter zu sichern (Haseeb et al., 2019; Hu, 2013). Es wurde betont, dass ein  
menschenzentrierter Ansatz entscheidend ist, um negative Auswirkungen auf die Mit-

arbeiter zu minimieren und die Effektivität der Systeme zu maximieren (Grosse et al., 2023; Kadir et al., 2019; Neumann et al., 2021).

Um die Notwendigkeit der Teleoperation zu erläutern, wurde auf das autonome Fahren eingegangen, dass eine Technologie bezeichnet, bei der Fahrzeuge ohne menschliches Eingreifen fahren können (Queck et al., 2022). Dies bezüglich hat die SAE ein Klassifikationssystem entwickelt, das von Stufe 0 (keine Automatisierung) bis Stufe 5 (vollständige Automatisierung) reicht (SAE J3016, 2021). Die Teleoperation dient als Unterstützung für autonome Fahrzeuge, um die Sicherheit zu erhöhen und unbekannte Situationen in bekannte umzuwandeln, die das autonome System bewältigen kann (Lu et al., 2022). So besteht die größte Herausforderung für autonome Fahrzeuge in der Indeterminiertheit von Umgebungsbedingungen wie Wetter und unvorhersehbarem menschlichem Verhalten (Yurtsever et al., 2020). Zudem zeigen Studien, dass teilautonome Fahrzeuge an einer signifikanten Anzahl von Unfällen beteiligt sind, was die Notwendigkeit einer sorgfältigen Überwachung und kontinuierlichen Verbesserung der Technologie unterstreicht (Kroman, 2022). Die Abhängigkeit von maschinellen Lernmodellen, die auf spezifischen Datensätzen basieren, führt dazu, dass die Leistung in neuen oder extremen Situationen abfallen kann (Lu et al., 2022).

Die Teleoperation selbst bezeichnet hierbei das Fernsteuern oder die Fernunterstützung von Prozessen oder Systemen (Queck et al., 2022). Im Bereich des autonomen Fahrens umfasst die Teleoperation alle Funktionen, die notwendig sind, um Fahrzeuge aus der Ferne zu unterstützen oder zu steuern (Majstorovic et al., 2022). In dieser Arbeit wurde sich mit den fahrbezogenen Aufgaben auseinandergesetzt. Diese umfassen direkte Interaktionen mit dem Fahrzeug, wie das Manövrieren auf öffentlichen Straßen und ersetzen oder ergänzen die Funktionen des automatisierten Fahrens (Brecht et al., 2024). Dabei kann die Teleoperation auf zwei Arten erfolgen (Majstorovic et al., 2022). Beim Remote Driving (Direkte Steuerung) übernimmt der Teleoperator vollständig die Kontrolle über das Fahrzeug, indem er direkte Steuerbefehle wie Lenkwinkel und Geschwindigkeit gibt (Gnatzig, 2015; Lu et al., 2022). Diese Form der Teleoperation wird oft in komplexen Umgebungssituationen eingesetzt, die das autonome System allein nicht bewältigen kann (Lu et al., 2022). Das Remote Assistance (Indirekte Steuerung) bezeichnet eine Methode, bei der der Operator „High-Level-Anweisungen“, die bestimmte Funktionen des autonomen Fahrens ansprechen, wie die Planung einer neuen Route oder die Beantwortung spezifischer Fragen. Das autonome System behält dabei die Kontrolle über die Fahraufgabe (Lu et al., 2022; Majstorovic et al., 2022). Die Anwendung des Remote Driving ist üblich bei Fahrzeugen der Automatisierungsstufen 0 – 2. Ab den Stufen 3 - 5 wird das Remote Assistance bevorzugt. Diesen Arten der Teleoperation lassen sich verschiedene Tele-

operationskonzepte zuordnen, die in dieser Arbeit im Detail betrachtet wurden. Zum Remote Driving zählen die Teleoperationskonzepte Direct Control, Shared Control und Trajectory Guidance. Die Remote Assistance umfasst das Waypoint Guidance, das Interactive Path Planning und die Perception Modification (Majstorovic et al., 2022).

Das Konzept der Direct Control ermöglicht es einem Teleoperator, das Fahrzeug direkt zu steuern, indem er basierend auf Umgebungsdaten wie Videoströmen und Sensordaten Geschwindigkeits- und Lenksignale sendet. Trotz seiner Effizienz leidet dieses Konzept unter eingeschränktem Situationsbewusstsein und einer hohen mentalen Arbeitsbelastung des Bedieners. Zudem ist es stark abhängig von der Stabilität des Mobilfunknetzes und anfällig für Netzwerkprobleme wie Latenzzeiten oder Datenübertragungsverluste.

Shared Control verbessert die direkte Steuerung durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen. Es unterstützt den Fahrer in Echtzeit, verbessert die Sicherheit des ferngesteuerten Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer. Die Eingaben des Fahrers werden hinsichtlich der Sicherheitsziele bewertet und bei Bedarf von der Fahrzeugsteuerung übersteuert. Dies erhöht zwar das Sicherheitspotenzial, stellt jedoch zusätzliche Anforderungen an die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Bei Trajectory Guidance übernimmt das Fahrzeug die direkte Steuerung, während der Bediener die Wahrnehmungs- und Planungsaufgaben übernimmt. Die Steuerbefehle des Bedieners werden als Trajektorien umgesetzt, die das Fahrzeug dann verfolgt. Dies entlastet den Bediener von latenzkritischen Steuerungsaufgaben und ermöglicht eine einfache Integration in autonome Fahrzeugmodule.

Waypoint Guidance ähnelt der Trajectory Guidance, wobei die endgültige Entscheidung über die Trajektorie vom autonomen Fahrzeug getroffen wird. Der Bediener plant den Pfad durch Spezifikation diskreter Wegpunkte, die das Fahrzeug dann verfolgt. Dieses Konzept ist robust gegenüber Netzwerklatenzproblemen und ermöglicht eine effiziente Aufgabenbewältigung mit geringerer Arbeitsbelastung.

Interactive Path Planning ermöglicht eine Echtzeit-Interaktion zwischen Mensch und Maschine auf der Ebene der Pfadplanung. Es kombiniert verschiedene Informationen aus den Modulen eines autonomen Fahrzeugs, um eine optimierte Pfadplanung unter Berücksichtigung dynamischer Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Dies reduziert die kognitive Belastung des Bedieners und verbessert die Effizienz und das Situationsbewusstsein.

Das Konzept der Perception Modification unterstützt das Wahrnehmungsmodul in autonomen Fahrzeugen, indem es die automatische Wahrnehmung durch menschliche

Unterstützung ergänzt. Dies erhöht die Zuverlässigkeit der autonomen Funktionen und reduziert die Gevisamtarbeitsbelastung des Bedieners. In Situationen, in denen die autonome Wahrnehmung fehlerhaft ist, ermöglicht es dem Bediener, das Umgebungsmodell des Fahrzeugs anzupassen und so den Betrieb fortzusetzen.

Um den allgemeinen Aufbau eines Teleoperationssystems zu verstehen, wurde die grundlegende Systemarchitektur erläutert. Diese umfasst vier Hauptkomponenten (Amador et al., 2022): die Teleoperationsstation, die Mensch-Maschinen-Schnittstelle, die drahtlose Kommunikation und das teleoperierte Fahrzeug. Die Benutzerschnittstellen variieren stark je nach Anwendungsfall und können von einfachen Anzeigen bis hin zu komplexen Systemen mit audiovisuellen und haptischen Rückmeldungen reichen (Amador et al., 2022).

Ebenso wurden beispielhafte Anwendungsszenarien der Teleoperationstechnologien genannt. Diese finden zunehmend Anwendung im öffentlichen Straßenverkehr, insbesondere bei der Optimierung von Transportprozessen und der Verbesserung der Arbeitsbedingungen (Cruise, 2024; Einride, 2024; Elmo, 2024a; Fernride, 2024; Vay, 2024; Waymo, 2024; Zoox, 2024). Im nicht-öffentlichen Bereich wird Teleoperation eingesetzt, um die Sicherheit und Produktivität zu erhöhen und die Arbeitsbedingungen zu verbessern (Komatsu, 2021; Phantom Auto, 2024; Sandvik, 2024; Skogforsk, 2024).

Weiterhin befasste sich diese Arbeit mit der Gesetzgebung hinsichtlich der Teleoperation und des autonomen Fahrens. So bildet auf internationaler Ebene die Wiener Straßenverkehrskonvention von 1968 die Grundlage vieler nationaler Verkehrsgesetze und definiert den „Driver“ als eine physisch anwesende Person, die das Fahrzeug steuert (United Nations, 1968). Automatisierte Systeme fallen nicht unter diese Definition, was als rechtliche Herausforderungen für die Verbreitung von autonomen Fahrsystemen identifiziert wurde. Neuere Resolutionen der UNECE erkennen die Notwendigkeit an, die Gesetzgebung an das automatisierte Fahren anzupassen und definieren den „Remote Driver“ für Teleoperationszwecke (UNECE, 2020, 2022).

Im Europäischen Raum regelt die Durchführungsverordnung 2022/1426 die Typgenehmigung für vollautomatisierte Fahrzeuge und definiert spezifische Anwendungsbereiche wie „Hub-to-hub“ und „Automatisiertes Parken“. Sie enthält jedoch keine spezifischen Regelungen für teleoperiertes Fahren, definiert aber den „Bediener für den Ferneingriff“, der nicht als Fahrer gilt, aber aus der Ferne Aufgaben übernehmen kann (Europäische Kommission, 2022).

In Deutschland erlaubten Änderungen im Wiener Übereinkommen und Straßenverkehrsgesetz (StVG) die Nutzung von hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen

unter bestimmten Bedingungen und definieren die Rechte und Pflichten des Fahrers (BGBl. II, 2016; Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2017). Weiterhin ermöglichte 2021 das Gesetz zum autonomen Fahren den Einsatz von Fahrzeugen mit autonomen Fahrfunktionen in festgelegten Betriebsbereichen ohne physische Anwesenheit eines Fahrers. In Bezug auf die Anwendung der Teleoperation wurde ebenso auf die Definition des „technischen Aufsehers“ eingegangen. Dieser muss stets verfügbar sein, um in Notfällen eingreifen zu können (BGBl. I, 2021).

Im Kontext der Industrie 5.0 spielt die Teleoperation eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Kernthemen, insbesondere hinsichtlich der Mensch-Maschinen-Interaktion. Sie verbindet die menschliche Intuition mit maschineller Effizienz und ermöglicht eine sichere und flexible Interaktion. Wichtig ist hierbei ein menschenzentriertes Design der Benutzerschnittstelle, um Teleoperationsaufgaben effizient umsetzen zu können.

Diesbezüglich stehen Teleoperatoren vor Herausforderungen, die aus der Entkopplung der natürlichen Wahrnehmung von der physischen Umgebung resultieren (Henriksson & Rehnmark, 2023). Die Gestaltung der Benutzerschnittstelle ist dabei entscheidend, um schlechte Benutzererfahrungen zu vermeiden (Henriksson & Rehnmark, 2023; Hoffmann & Diermeyer, 2021). So ist die eingeschränkte Situationswahrnehmung bei der Teleoperation eine zentrale Herausforderung, da Operatoren nicht derselben Umgebungswahrnehmung ausgesetzt sind, wie beim realen Fahren. Die Schwierigkeiten umfassen die korrekte Einschätzung von Geschwindigkeit, Bewegungsänderungen und Trajektorien. Um diese Herausforderungen zu überwinden, ist eine verbesserte visuelle Integration in die Umgebung des Fahrzeugs durch umfassende Videoinformationen und multisensorische Eingaben entscheidend. Zudem beeinflusst die Gesamtsystemlatenz die Teleoperationsleistung erheblich (Mutzenich et al., 2021). Sie setzt sich aus verschiedenen Quellen zusammen, darunter Sensor-, Netzwerk-, Signalverarbeitungs- und Aktuatorlatenzen (Chucholowski et al., 2014; Georg, Putz & Diermeyer, 2020; Liu et al., 2017; Mansour et al., 2012). Eine Gesamtlatenz unter 170ms beeinträchtigt die Leistung nur geringfügig, während Latenzen über 300ms zu signifikanten Leistungseinbußen führen können (Chen et al., 2007; Gnatzig et al., 2013). Die Auswirkungen der Latenz reichen von der Beeinträchtigung der Fahrleistung bis hin zu emotionalen Reaktionen der Teleoperatoren (Bodell & Gulliksson, 2016; Chen et al., 2007; Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024).

Weiterhin ist die Qualifikation der Teleoperatoren entscheidend für eine sichere und effektive Fahrzeugsteuerung (Hampshire et al., 2020). Die Operatoren müssen schnell Fehler erkennen und korrigieren können, besonders in Stresssituationen. Die Schulung und Regulierung der Teleoperatoren ist daher unerlässlich, um den spezifischen Anforderungen der Teleoperation gerecht zu werden (Schwindt et al., 2023).

Aus diesem Grund wurde in Kapitel 4 dieser Arbeit auf unterschiedliche Formen des Feedbacks eingegangen, um die Herausforderungen der Situationswahrnehmung und der Latenz anzugehen. Visuelles Feedback ist hierbei zentral für die Verbesserung der Situationswahrnehmung und umfasst Technologien der Virtual-, Augmented- und Mixed-Reality sowie unterschiedliche Unterstützungsformen (Zhao, Nybacka, Rothhämel & Drugge, 2023). Dazu zählt die *Fusion mehrerer Sensorinformationen*, bei der Lidar- und Kameradaten zur Schaffung einer immersiven Anzeige fusioniert werden (Schimpe et al., 2022). Ebenso können VR bzw. MR durch eine interaktive virtuelle Umgebung und Mehrperspektivität zur Verbesserung der Positionswahrnehmung beitragen (Chellali & Baizid, 2011; Hosseini & Lienkamp, 2016; Rodriguez et al., 2002; Vozar & Tilbury, 2012).

Weiterhin verbessert der Einsatz von Head-Worn Displays mit Kopftrackern die Situationswahrnehmung, indem der Operator bei der Richtungswahrnehmung unterstützt wird (Fabris et al., 2021). Außerdem helfen Techniken wie die Bewegungsunschärfe und Zoom-Unschärfe bei der Optimierung der Geschwindigkeitswahrnehmung (Tang et al., 2013) und hochauflösende Kameras und die Applikation stereoskopischer Sicht verbessern die Tiefenwahrnehmung und Distanzwahrnehmung (Georg & Diermeyer, 2019; Y. Luo et al., 2022; Tyczka et al., 2012). Dabei ist stets in Betracht zu ziehen, dass die Implementierung dieser Technologien und Feedbackformen sorgfältig abgewogen werden muss, um Überlastung zu vermeiden und die Effizienz der Teleoperation nicht zu beeinträchtigen. Die Balance zwischen ausreichender Informationsbereitstellung und Vermeidung von kognitiver Überlastung ist entscheidend.

Auch Force-Feedback spielt eine entscheidende Rolle beim teleoperierten Fahren, insbesondere da die direkte physische Verbindung, wie sie in konventionellen Lenksystemen vorhanden ist, fehlt. Dies beeinträchtigt das realistische Fahrgefühl, da die Lenkbefehle elektronisch und oft über 4 bzw. 5G-Netze übertragen werden, was Flexibilität erhöht, jedoch auch Herausforderungen bezüglich Latenz und Sicherheit mit sich bringt (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Dabei wurde im Rahmen dieser Arbeit auf unterschiedliche Technologien zur Erzeugung eines Lenkkraft-Feedbacks eingegangen.

Das physikalisch, modellbasierte Lenkkraft-Feedback nutzt physikalische Gesetze zur Erzeugung realistischer Lenkkräfte. Herausfordernd kann dabei die Synchronisierung des Feedbacks mit den tatsächlichen Fahrbedingungen aufgrund variabler Latenzen sein (Balachandran & Gerdes, 2015; Chugh et al., 2020; Guo et al., 2022; Mohellebi et al., 2009).

Drehmomentkarten-basiertes Lenkkraft-Feedback setzt zur Erstellung von Drehmomentkarten Eingangsparametern wie Lenkwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit mit

dem resultierenden Lenkdrehmoment ins Verhältnis. Daraus kann dann das Lenkkraft-Feedback berechnet werden. Vorteilhaft bei dieser Methode ist dabei die schnelle Berechnung und geringere Latenz im Feedback. Jedoch kann bei komplexeren Vibrationen ein weniger realistisches Fahrgefühl entstehen (Lee et al., 2020).

Beim Lenkstrom-basierten Lenkkraft-Feedback wird der Spannungswert, der durch den Lenkmotor fließt, genutzt, um realistisches Feedback zu liefern. Latenzen bei der Signalübertragung, können zu Verzögerungen im Feedback führen (Ba-Hai Nguyen & Jee-Hwan Ryu, 2009; Zhao et al., 2022).

Ein adaptiver Drehmomentregler, basierend auf einem neuronalen Netzwerk, um die Fahrzeugdynamik zu approximieren und das Lenkmoment dynamisch anzupassen wird beim adaptiven Lenkkraft-Feedbackmodell angewandt. Das Ziel ist es, möglichst realistische Lenkreaktionen zu erzeugen, indem das Fahrer-Fahrzeug-System an ein Referenzmodell angenähert wird (Jiang et al., 2019).

Als letzte Methode wurde das Maschinelle Lernen für Lenkkraftrückmeldungsmodelle erläutert. Dabei modelliert ein neuronales Netzwerk die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, lernt die dynamischen Eigenschaften des Systems und berechnet gewünschte Rückkopplungsmomente. Der Vorteil liegt darin, nichtlineare Eigenschaften der Rückkopplungskraft simulieren zu können und neue Daten während der Fahrt zur Anpassung des Feedbacks zu nutzen (Van Ende et al., 2016).

Ebenso ist Motion Cueing-Feedback eine Schlüsseltechnologie, um Teleoperatoren ein realistisches Gefühl für Fahrzeugbewegungen zu vermitteln. Dies ist insbesondere in Situationen wichtig, in denen visuelle Informationen allein nicht ausreichen. Diese Technologie ist besonders wichtig, um Unsicherheiten bei der Fahrzeugsteuerung zu minimieren. In dieser Arbeit wurden zwei Hauptansätze für das Motion Cueing-Feedback behandelt. Die erste basiert auf einem Washout-Filter, die zweite auf einer modellprädiktiven Steuerung MPC.

Die Ansätze mithilfe eines Washout-Filters lassen sich in drei Varianten unterteilen – den klassischen-, optimalen- und adaptiven- Filter. Der klassische Washout-Filter transformiert die Fahrzeugbewegungen innerhalb der begrenzten Bewegungsfreiheit der Plattform (S.-C. Wang & Fu, 2004). Um realistischere Bewegungen zu erzeugen, berücksichtigt der optimale Washout-Filter die menschliche Wahrnehmung (Asadi et al., 2015; Huang & Fu, 2006). Beim Adaptive Washout-Filter erfolgt zusätzlich eine dynamische Anpassung der Parameter an die aktuellen Bewegungsanforderungen (Murgovski, 2007). Die MPC-Technik basiert auf einem dynamischen Modell des Systems und optimieren mehrere Ziele gleichzeitig. Sie berücksichtigen die physischen



Begrenzungen der Bewegungsplattform und integrieren diese direkt in das Optimierungsproblem (Augusto & Loureiro, 2009; Maran, 2013).

Weiterhin wurden sich im Rahmen dieser Arbeit mit dem Vibrations- und Audio-feedback auseinandergesetzt. Dieses ist entscheidend, um die Herausforderungen der Bewegungskrankheit und eingeschränkten Umgebungswahrnehmung beim teleoperierten Fahren zu adressieren. Untersucht wurden propriozeptive Vibrationen als auch Imitationen tatsächlicher Straßenvibrationen im Rahmen der Teleoperation (Lucas et al., 2020). Beide Varianten sind in der Lage das Risiko von Bewegungskrankheiten zu reduzieren, wobei realistische Vibration effektiver sind (Reason, 1978). Akustisches Feedback ist in der Lage Informationen über Richtung und Entfernung relativ zu den Wegpunkten zu vermitteln, verbessert die Pfadverfolgung signifikant und reduziert Steuerfehler (Larsson et al., 2023; Vasilijevic et al., 2018). Auch wurden Beispiele für neuartige Benutzer-Fahrzeug-Schnittstellen vorgestellt. Diese innovativen Steuergeräte werden entwickelt, um die Wahrnehmung und Steuerung in der Teleoperation zu verbessern (Nguyen & Ryu, 2010; Tyagi & Mascaro, 2018).

Neben der Situationswahrnehmung wurde die Latenz als eine signifikante Herausforderung beim teleoperierten Fahren, trotz der Nutzung fortschrittlicher Technologien wie 5G-Netzwerke, identifiziert (Neumeier et al., 2022). Zwei Hauptansätze zur Minderung der negativen Auswirkungen von Latenz sind die Videovorhersage und -korrektur sowie die Fahrzeugzustandsvorhersage. Verschiedene Methoden werden bei der Videovorhersage und -korrektur eingesetzt, um die Genauigkeit der Videodaten und die Reaktionsfähigkeit des Systems zu verbessern.

Ein Ansatz befasst sich mit der Trajektorienvorhersage um dem Operator selbst bei Netzwerkverzögerungen die aktuelle Fahrzeugumgebung darzustellen. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften und die Bewegungsdynamik des Fahrzeugs verwendet, um dessen zukünftige Positionen und Trajektorien vorherzusagen, wobei die genaue Position des Fahrzeugs, unter Einbezug der Verzögerung, nicht berücksichtigt wird (Ren et al., 2016). Forscher der BMW Group und der Technischen Universität München verbesserten die Vorhersagegenauigkeit durch Integration der Operator-Eingaben in den Regelkreis, wobei das Modell auf konstante Latenzen ausgerichtet ist und somit die Genauigkeit stark von der angenommenen Latenz abhängt (Graf et al., 2020).

Dieses Problem wird mithilfe der perspektivischen Vorhersageanzeige adressiert. Diese Technik simuliert zukünftige Ansichten des Fahrzeugs basierend auf seiner aktuellen Geschwindigkeit und den vorliegenden Datenübertragungsverzögerungen. Durch diese Simulationen kann der Fahrer oder das automatisierte System eine realistischere Vorstellung von dem erhalten, was sich vor ihnen befindet, selbst wenn die

Datenübertragung zeitlich verzögert ist (Prakash et al., 2020). Ein weiterer Ansatz gründet in der Visualisierung von Echtzeit-Latenzen. Hierbei wird die latenzbedingte Differenz zwischen der tatsächlichen Position des Fahrzeugs und der Position, wie sie übertragen wird, dargestellt. Diese Information ist von großer Bedeutung, da sie die Verzögerungen in der Datenübertragung sichtbar macht und somit korrigierende Maßnahmen erleichtert (Sato et al., 2021).

Schließlich wurde in dieser Arbeit ein proaktiver Ansatz der Videovorhersage vorgestellt, der Feed-Forward-Vorhersagemodelle nutzt. Diese Modelle manipulieren visuelle Daten so, dass sie eine bestmögliche Schätzung dessen darstellen, was der Operator sehen würde, wenn es keine Verzögerung gäbe. Solche proaktiven Techniken verbessern die Reaktionsfähigkeit und Genauigkeit der Fahrzeugsteuerung unter Verwendung von Vorhersagedaten, um potenzielle Verzögerungen zu kompensieren und die visuelle Darstellung der Fahrzeugumgebung in Echtzeit zu optimieren (Brudnak, 2016). Die Vorhersage zukünftiger Fahrzeugzustände ist entscheidend, um die Sicherheit, Effizienz und Reaktionsfähigkeit von Fahrzeugsystemen zu verbessern. Diese Methoden nutzen unterschiedliche Ansätze, um mit den Herausforderungen der Echtzeitdatenverarbeitung und -übertragung umzugehen.

So entwickelten Forscher ein Beobachter-basiertes Framework zur Vorhersage zukünftiger Fahrzeugzustände, das interne Zustände des Systems schätzt ohne dabei auf ein detailliertes Modell angewiesen zu sein (Tandon et al., 2014). Dieser modellfreie Prädiktor wurde dann im Rahmen einer Studie in die Architektur eines teleoperierten Fahrzeuges integriert (Ge et al., 2015). Weiterhin wurde ein Ansatz zur Kompensation von CAN-Bus Verzögerungen, basierend auf einem Smith-Prädiktor, vorgestellt. Der Prädiktor nutzt Echtzeitdaten, um zukünftige Zustände des Systems vorherzusagen und ermöglicht durch ein Feedback-Kontrollgesetz eine Anpassung der Fahrzeugsteuerung, um Verzögerungen zu kompensieren (H. Zhang et al., 2018).

Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Arbeit auf einen modellprädiktiven Regelungsansatz eingegangen, um zukünftige Fahrzeugpositionen vorherzusagen und der Lidar-Daten verwendet, um Hindernisse relativ zur zukünftigen Position darzustellen, so dass Verzögerungen in der Datenübertragung ausgeglichen werden können (Nasry et al., 2013). Abschließend wurde ein Ansatz der SRPT-Methode erläutert, um die Auswirkungen von Latenzen durch die Verwendung von Referenzposten zu mindern (Prakash, Vignati & Sabbioni, 2023).

Außerdem befasste sich diese Arbeit mit Haptischen Rückmeldungen, da diese eine vielversprechende Lösung zur Unterstützung der Fahrzeugsteuerung bei eingeschränkter Sichtqualität und Übertragungsverzögerungen bieten. So entwickelten Fennel et al. (2021) einen Ansatz zur Pfaderzeugung mittels einer haptischen Schnittstelle,

die es dem Operator ermöglicht, Pfade zu erstellen, die kinematischen und dynamischen Einschränkungen des Roboters entsprechen, ohne die Entscheidungsfreiheit zu beeinträchtigen. Weitere Forschungen zur Kollisionsvermeidung wurden analysiert, darunter die Entwicklung eines künstlichen Potenzialfelds zur Kollisionsvermeidung (Le et al., 2016), ein Assistenzsystem zur Vorhersage potenzieller Seitenkollisionen (Hosseini et al., 2016) sowie ein Verfahren, welches die Wahrnehmung von Geschwindigkeitsunterschieden in zeitverzögerten Umgebungen verbessert (Sungjun Park et al., 2010).

Diese Arbeit hat sich ebenfalls mit dem Nachhaltigkeitsaspekt der Teleoperation auseinander gesetzt. Dabei wurde deutlich, dass akutell wenig Literatur existiert, die diesen Bereich adressiert. Dennoch bietet die Teleoperation, besonders im Hinblick auf das Potential der geteilten Mobilität, einige nennenswerte Vorteile. Dazu zählt die Reduzierung der Fahrzeuge pro Person und der damit einhergehende geringere Ressourcenverbrauch. Auch strukturelle Veränderungen, wie das Entfernen von Steuerelementen im Fahrzeug, kann durch das fehlende Gewicht, positiven Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit haben.

Schließlich befasste sich diese Arbeit mit spezifischen Chancen der Teleoperation. Dies bezüglich ist besonders hervorzuheben die Steigerung der Sicherheit und Effizienz von autonomen Fahrzeugen zu nennen. Auch eröffnet die Teleoperation die Möglichkeit für neue Geschäftsmodelle und kann neben den Personalkosten auch das Verletzungsrisiko für Arbeiter in gefährlichen Umgebungen senken.

## 8 Ausblick

Für eine zukünftige, umfassenden Anwendung der Teleoperation im öffentlichen Straßenverkehr bedarf es weiterer Forschung. Im Folgenden sollen zentrale Themengebiete vorgestellt werden, die in Zukunft eine entscheidende Rolle in der erfolgreichen Umsetzung der Teleoperation spielen werden.

So bedarf es weiterer Forschung, um dauerhafte, stabile bidirektionale Verbindungen zwischen Operator und Fahrzeug zu gewährleisten. Dies ist aufgrund des hohen Datentransfers im Rahmen der Teleoperation und dem damit einhergehenden Risiko von Netzwerküberlastungen, die zu Verzögerungen und Datenverlust führen, besonders wichtig. Ein gut konzipiertes System, das die Signalstärke auch über große Entfernungen wiederherstellen kann, ist notwendig, um eine effiziente Teleoperation zu gewährleisten.

Ebenso sollten sich die Forschungsarbeiten darauf konzentrieren, die Datenmenge bei der Informationsübertragung zu reduzieren, um die Übertragungseffizienz weiterhin zu verbessern. In dieser Hinsicht stellt die Etablierung der 5G-Technologie, aufgrund der verbesserten Datenübertragungsgeschwindigkeit, ein vielversprechendes Element im Hinblick auf eine globale Anwendung der Teleoperation dar. Zudem ist, aufgrund der hohen Anfälligkeit der Teleoperationssysteme für Cyberangriffe, eine Fokussierung auf die Sicherheit dieser Systeme erforderlich, wobei die Sicherheitsmaßnahmen sowohl komplex als auch benutzerfreundlich gestaltet sein sollten, um die Kosten für die Überwachung durch Experten zu minimieren (Opiyo et al., 2021).

Der Einsatz von multimodalen Schnittstellen hat die Präsenz des Bedieners in der Umgebung des Roboters verbessert, jedoch sind die Möglichkeiten, physische Empfindungen wie Vibrationen oder Temperaturen zu übermitteln, noch nicht ausreichend erforscht (Opiyo et al., 2021). Dies könnte insbesondere bei der Beförderung von Fahrgästen ein entscheidender Faktor sein, bei der die Wahrnehmung von Trägheitseffekte seitens des Teleoperators, signifikanten Einfluss auf den Fahrkomfort der Passagiere haben kann. Die Entwicklung von Benutzerschnittstellen, die menschliche, kognitive Aspekte berücksichtigt, sind entscheidend für die Arbeitsbelastung der Teleoperatoren. Dabei sollten diese Systeme primär darauf ausgerichtet sein, den Menschen zu unterstützen. Zentral ist hierbei die Erforschung des Einsatzes von Lernstrategien in Teleoperationssystemen, die auf den Erkenntnissen über die menschliche Verarbeitungsmechanismen basieren, um die Arbeitsbelastung zu reduzieren. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Systeme benutzerfreundlicher und effektiver in der Anwendung zu gestalten (J. Luo et al., 2020).

In Bezug auf das Head-Mounted Display (HMD) hat sich gezeigt, dass diese Technologie die Immersion und Steuerfähigkeit verbessern kann, jedoch auch Nachteile wie Bewegungskrankheit und hohe Kosten mit sich bringen. Zukünftige Forschungen sollten darauf abzielen, diese Technologie wirtschaftlicher und komfortabler zu gestalten und gleichzeitig eine umfassende sensorische Rückmeldung zu ermöglichen, um die kognitive Belastung des Bedieners weiter zu reduzieren (Opiyo et al., 2021).

Ein zentrales Thema bei der zukünftigen Anwendung der Teleoperation könnte zudem das „Connected Remote Driving“ sein. Darunter versteht man das Abgreifen von Sensorinformationen der sich in der Umgebung befindlichen Fahrzeuge. Diese zusätzlichen Informationen können die Entwicklung und Effizienz von Teleoperationssystemen entscheidend verbessern (Zhao, Nybacka, Aramrattana et al., 2024). Zum Beispiel ist es möglich, die beabsichtigten Trajektorien der umgebenden Fahrzeuge zu teilen, um dadurch eine schnellere und sichere Fahrzeugsteuerung zu ermöglichen. Ebenso ist „Fahrzeug-Platooning“ möglich, bei der eine Gruppe von Fahrzeugen, durch den kontinuierlichen Austausch periodischer Daten, gemeinsam dicht hintereinander fährt (Bagheri et al., 2021).

Außerdem können Cloud-Technologien als Plattformen für den Datenaustausch dienen. Sie bieten den Vorteil, Datenverarbeitungsprozesse auslagern zu können, um so die Rechenlast des Fahrsystems zu verringern und den Austausch von Informationen zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen zu vereinfachen. Weiterhin könnten automatisierte Fahrfunktionen ausgelagert werden um die Abhängigkeit der Teleoperation von menschlichen Operatoren zu verringern (T. Zhang, 2020).

Letztendlich ist für den Übergang vom traditionellen Fahren zum teleoperierten Fahren entscheidend, inwieweit andere Verkehrsteilnehmer dieser Technologie vertrauen. Analog zu autonomen Fahrzeugen besteht die Befürchtung, dass das Fehlen eines physisch anwesenden Fahrers von anderen Verkehrsteilnehmern als Indikator für Unzuverlässigkeit gesehen werden könnte. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, das aktuelle Vertrauensniveau, das Verkehrsteilnehmer diesen ferngesteuerten Systemen entgegenbringen, zu erforschen und Strategien zu entwickeln, um dieses Vertrauen zu stärken. Dies könnte durch verbesserte Kommunikationsstrategien, die Demonstration der Zuverlässigkeit der Technologie in verschiedenen Szenarien oder durch Bildungsinitiativen, die auf eine breitere Akzeptanz der Technologie abzielen, erreicht werden. Insgesamt ist die Vertrauensbildung ein kritischer Faktor, der über die erfolgreiche Integration und Akzeptanz von Fernfahrttechnologien im öffentlichen Verkehr entscheiden wird.

## Literaturverzeichnis

- Allison, R. S., Harris, L. R., Jenkin, M., Jasiobedzka, U., & Zacher, J. E. (2001). Tolerance of temporal delay in virtual environments. In H. Takemura & K. Kiyokawa (Hrsg.), *IEEE Virtual Reality 2001* (S. 247–254). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/VR.2001.913793>
- Amador, O., Aramrattana, M., & Vinel, A. (2022). A Survey on Remote Operation of Road Vehicles. *IEEE Access*, 10, 130135–130154. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229168>
- Amanatiadis, A., Gasteratos, A., Georgoulas, C., Kotoulas, L., & Andreadis, I. (2008). Development of a stereo vision system for remotely operated robots: A control and video streaming architecture. *2008 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems*, 14–19. <https://doi.org/10.1109/VECIMS.2008.4592745>
- Asadi, H., Mohamed, S., Nelson, K., Nahavandi, S., & Zadeh, D. R. (2015). Human Perception-Based Washout Filtering Using Genetic Algorithm. In S. Arik, T. Huang, W. K. Lai & Q. Liu (Hrsg.), *Neural Information Processing* (S. 401–411, Bd. 9490). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26535-3\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26535-3_46)
- Augusto, B., & Loureiro, R. (2009). Motion cueing in the Chalmers driving simulator - A model predictive control approach. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:60268476>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Bagheri, H., Noor-A-Rahim, M., Liu, Z., Lee, H., Pesch, D., Moessner, K., & Xiao, P. (2021). 5G NR-V2X: Toward Connected and Cooperative Autonomous Driving. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(1), 48–54. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.2000069>
- Ba-Hai Nguyen & Jee-Hwan Ryu. (2009). Direct current measurement based steer-by-wire systems for realistic driving feeling. *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1023–1028. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5221999>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Balachandran, A., & Gerdes, J. C. (2015). Designing Steering Feel for Steer-by-Wire Vehicles Using Objective Measures. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1), 373–383. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2324593>

- Becker, M., Daube, C. H., & Reinking, E. (2023). Industrie 5.0: IUCF Working Paper. <https://hdl.handle.net/10419/270296>
- Bendig, D., Kevin Lau, Julia Schulte & Stefan Endriss. (2021). Industrie 5.0 - Die Europäische Kommission auf den Spuren der nächsten industriellen Revolution? *Industrie 4.0 Management*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:245290504>
- BGBI. I. (2021). Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes - Gesetz zum autonomen Fahren.
- BGBI. II. (2016). Gesetz zur Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr. <https://dejure.org/2016,44849>
- Björnberg, A. (2020). *Shared Control for Vehicle Teleoperation with a Virtual Environment Interface* [Diss., KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS)].
- Bodell & Gulliksson. (2016). Teleoperation of Autonomous Vehicle with 360° Camera Feedback. <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/f20dbe52-e3e2-4a6e-b019-be2ca2376b15/content>
- Bogdoll, D., Orf, S., Töttel, L., & Zöllner, J. M. (2021). Taxonomy and Survey on Remote Human Input Systems for Driving Automation Systems. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-98015-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98015-3_6)
- Brecht, D., Gehrke, N., Kerbl, T., Krauss, N., Majstorovic, D., Pfab, F., Wolf, M.-M., & Diermeyer, F. (2024). Evaluation of Teleoperation Concepts to solve Automated Vehicle Disengagements. <http://arxiv.org/pdf/2404.15030>
- Brudnak, M. (2016). Predictive displays for high latency teleoperation. [https://www.researchgate.net/publication/305904651\\_PREDICTIVE\\_DISPLAYS\\_FOR\\_HIGH\\_LATENCY\\_TELEOPERATION/citations](https://www.researchgate.net/publication/305904651_PREDICTIVE_DISPLAYS_FOR_HIGH_LATENCY_TELEOPERATION/citations)
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2017). Achtes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes. <https://dejure.org/2017,20057>
- Casqueiro, A., Ruivo, D., Moutinho, A., & Martins, J. (2016). Improving Teleoperation with Vibration Force Feedback and Anti-Collision Methods. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27146-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27146-0_21)
- Chellali, R., & Baizid, K. (2011). What Maps and What Displays for Remote Situation Awareness and ROV Localization? In G. Salvendy & M. J. Smith (Hrsg.), *Human interface and the management of information* (S. 364–372, Bd. 6772). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21669-5\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21669-5_43)
- Chen, J. Y. C., 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. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905819>

- Chucholowski, F., Tang, T., & Lienkamp, M. (2014). Teleoperiertes Fahren Sichere und robuste notenverbindungen. *ATZelektronik*, 9(1), 60–63. <https://doi.org/10.1365/s35658-014-0390-z>
- Chugh, T., Bruzelius, F., Klomp, M., & Shyrokau, B. (2020). An approach to develop haptic feedback control reference for steering systems using open-loop driving manoeuvres. *Vehicle System Dynamics*, 58(12), 1953–1976. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1662923>
- Cruise. (2024). Driving our mission. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://www.getcruise.com/>
- Demir, K. A., Döven, G., & Sezen, B. (2019). Industry 5.0 and Human-Robot Co-working. *Procedia Computer Science*, 158, 688–695. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>
- Einride. (2022). Einride unveils world’s first remote operator of autonomous, electric vehicle fleet. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://einride.tech/press/einride-unveils-worlds-first-remote-aet-operator-of-autonomous-electric/>
- Einride. (2024). The world’s leading provider of digital, electric and autonomous shipping technology. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://einride.tech/>
- Elmo. (2024a). Elmo. Verfügbar 23. Juli 2024 unter <https://www.elmoremote.com/>
- Elmo. (2024b). World’s first road-legal teledriving technology. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://www.elmoremote.com/>
- Endsley, M. R. (1988a). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*, 789–795. <https://doi.org/10.1109/NAECON.1988.195097>
- Endsley, M. (2000). Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review. *Situation awareness analysis and measurement*, 3–32.
- Endsley, M. R. (1988b). Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 32(2), 97–101. <https://doi.org/10.1177/154193128803200221>
- Europäische Kommission. (2022). Commission Implementing Regulation (EU) 2022/1426 of 5 August 2022: type-approval of the automated driving system (ADS) (Europäische Kommission, Hrsg.).
- European Commission. (2024). Industry 5.0: What this approach is focused on, how it will be achieved and how it is already being implemented. Verfügbar 14. August 2024 unter [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en)
- European Commission, Directorate-General for Research, Innovation, Breque, M., de Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/308407>



- Fabris, E. J., Sangalli, V. A., Soares, L. P., & Pinho, M. S. (2021). Immersive telepresence on the operation of unmanned vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(1), 172988142097854. <https://doi.org/10.1177/1729881420978544>
- Feiler, J., & Diermeyer, F. (2021). The Perception Modification Concept to Free the Path of An Automated Vehicle Remotely. *International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235233816>
- Fennel, M., Zea, A., & Hanebeck, U. D. (2021). Haptic-Guided Path Generation for Remote Car-Like Vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 4087–4094. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3067846>
- Fernride. (2024). Driving Logistics Automation. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://www.fernride.com/>
- Ge, X., Brudnak, M. J., Jayakumar, P., Stein, J. L., & Ersal, T. (2015). A model-free predictor framework for tele-operated vehicles. *2015 American Control Conference (ACC)*, 4573–4578. <https://doi.org/10.1109/ACC.2015.7172049>
- Georg, J.-M., & Diermeyer, F. (2019). An Adaptable and Immersive Real Time Interface for Resolving System Limitations of Automated Vehicles with Teleoperation. *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2659–2664. <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914306>
- Georg, J.-M., Feiler, J., Hoffmann, S., & Diermeyer, F. (2020). Sensor and Actuator Latency during Teleoperation of Automated Vehicles. *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 760–766. <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304802>
- Georg, J.-M., Putz, E., & Diermeyer, F. (2020). Longtime Effects of Videoquality, Videocanvases and Displays on Situation Awareness during Teleoperation of Automated Vehicles. In M. Elgendi & H. Shah-Mansouri (Hrsg.), *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (S. 248–255). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283364>
- Gnatzig, S., Schuller, F., & Lienkamp, M. (2012). Human-machine interaction as key technology for driverless driving - A trajectory-based shared autonomy control approach. In I. Staff (Hrsg.), *2012 IEEE Ro-Man* (S. 913–918). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2012.6343867>
- Gnatzig, S. (2015). Trajektorienbasierte Teleoperation von Straßenfahrzeugen auf Basis eines Shared-Control-Ansatzes. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:64791758>
- Gnatzig, S., Chucholowski, F., Tang, T., & Lienkamp, M. (2013). A System Design for Teleoperated Road Vehicles. *ICINCO 2013 - Proceedings of the 10th In-*

- ternational Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 231–238.
- Gorsich, D. J., Jayakumar, P., Cole, M. P., Crean, C. M., Jain, A., & Ersal, T. (2018). Evaluating mobility vs. latency in unmanned ground vehicles. *Journal of Terramechanics*, 80, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.10.001>
- Graf, G., Xu, H., Schitz, D., & Xu, X. (2020). Improving the Prediction Accuracy of Predictive Displays for Teleoperated Autonomous Vehicles. *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 440–445. <https://doi.org/10.1109/ICCAR49639.2020.9108011>
- Grosse, E. H., Sgarbossa, F., Berlin, C., & Neumann, W. P. (2023). Human-centric production and logistics system design and management: transitioning from Industry 4.0 to Industry 5.0. *International Journal of Production Research*, 61(22), 7749–7759. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2246783>
- Gugerty, L. J. (1997). Situation awareness during driving: Explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(1), 42–66. <https://doi.org/10.1037//1076-898X.3.1.42>
- Guillaume Doisy, Adi Ronen & Yael Edan. (2017). Comparison of three different techniques for camera and motion control of a teleoperated robot. *Applied Ergonomics*, 58, 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.05.001>
- Günther, N., Prell, B., & Reiff-Stephan, J. (2022). Industrie 5.0. In C. Härle, J. Jäkel & G. Sand (Hrsg.), *Tagungsband AALE 2022*. Hochschule für Technik Wirtschaft und Kultur. <https://doi.org/10.33968/2022.26>
- Guo, S., Liu, Y., Zheng, Y., & Ersal, T. (2022). A Delay Compensation Framework for Connected Testbeds. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(7), 4163–4176. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3091974>
- Hacinecipoglu, A., Konukseven, E. I., & Koku, A. B. (2013). Evaluation of haptic feedback cues on vehicle teleoperation performance in an obstacle avoidance scenario. *2013 World Haptics Conference (WHC)*, 689–694. <https://doi.org/10.1109/WHC.2013.6548492>
- Hampshire, R. C., Bao, S., Lasecki, W. S., Daw, A., & Pender, J. (2020). Beyond safety drivers: Applying air traffic control principles to support the deployment of driverless vehicles. *PloS one*, 15(5), e0232837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232837>
- Haseeb, M., Hussain, H. I., Ślusarczyk, B., & Jermisittiparsert, K. (2019). Industry 4.0: A Solution towards Technology Challenges of Sustainable Business Performance. *Social Sciences*, 8(5), 154. <https://doi.org/10.3390/socsci8050154>
- Henriksson, A., & Rehnmark, J. (2023). *Human-Machine Interaction within Teleoperation of Autonomous Vehicles : Designing Remote Operation from A User*

- Experience Perspective* [Diss., KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM)].
- Hoffmann, S., & Diermeyer, F. (2021). Systems-Theoretic Safety Assessment of Teleoperated Road Vehicles. <http://arxiv.org/pdf/2104.06795>
- Hoffmann, S., Majstorovic, D., & Diermeyer, F. (2022). Safe Corridor: A Trajectory-Based Safety Concept for Teleoperated Road Vehicles. *ICCVE 2022 conference proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCVE52871.2022.9742770>
- Hosseini, A., & Lienkamp, M. (2016). Enhancing telepresence during the teleoperation of road vehicles using HMD-based mixed reality. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1366–1373. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535568>
- Hosseini, A., Richthammer, F., & Lienkamp, M. (2016). Predictive Haptic Feedback for Safe Lateral Control of Teleoperated Road Vehicles in Urban Areas. *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504430>
- Hosseini, A., Wiedemann, T., & Lienkamp, M. (2014). Interactive path planning for teleoperated road vehicles in urban environments. *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2014)*, 400–405. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957723>
- Hu, S. J. (2013). Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. *Procedia CIRP*, 7, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>
- Huang, C.-I., & Fu, L.-C. (2006). Human Vestibular Based (HVB) Senseless Maneuver Optimal Washout Filter Design for VR-based Motion Simulator. *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 5, 4451–4458. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384835>
- Institution, B. S. (2022). Guidelines for developing and assessing control systems for automated vehicles; PAS 1880:2. <https://doi.org/10.3403/30391865>
- Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1683–1695. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892>
- Jiang, Y., Deng, W., Wu, J., Zhang, S., & Jiang, H. (2019). Adaptive Steering Feedback Torque Design and Control for Driver–Vehicle System Considering Driver Handling Properties. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(6), 5391–5406. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2908987>
- Jin Sol Lee, Youngjib Ham, Hangu Park & Jeonghee Kim. (2022). Challenges, tasks, and opportunities in teleoperation of excavator toward human-in-the-loop construction automation. *Automation in Construction*, 135, 104119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104119>

- Kadir, B. A., Broberg, O., & Souza da Conceição, C. (2019). Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106004. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>
- Kagermann, H., Helbig, J., Wahlster, W., & Hellinger, A. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern ; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Forschungsunion. <https://books.google.de/books?id=hzmFoAEACAAJ>
- Kagermann, H. (2014). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In A. Pinkwart, H. Albach, H. Meffert & R. Reichwald (Hrsg.), *Management of permanent change* (S. 23–45). Springer Gabler. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2)
- Karacan, K., Sadeghian, H., Kirschner, R., & Haddadin, S. (2022). Passivity-Based Skill Motion Learning in Stiffness-Adaptive Unified Force-Impedance Control. In Z. Wang, N. Ando & N. Yamanobe (Hrsg.), *IROS 2022 Kyōto - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (S. 9604–9611). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981728>
- 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. <https://doi.org/10.3390/mti5050026>
- Kim, H., Giacomo, T., Egges, A., Lyard, L., Garchery, S., & Thalmann, N. (2004). Believable Virtual Environment : Sensory and Perceptual Believability.
- Komatsu. (2021). Komatsu. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://www.komatsu.jp/en/newsroom/2021/20210910>
- Kong, X. T. R., Luo, H., Huang, G. Q., & Yang, X. (2019). Industrial wearable system: the human-centric empowering technology in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8), 2853–2869. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1416-9>
- Kroman, D. (2022). First-ever self-driving vehicle crash report released. Nearly all the WA wrecks involved Teslas [10.08.2024]. <https://www.seattletimes.com/seattle-news/transportation/first-ever-self-driving-vehicle-crash-report-released-nearly-all-involved-teslas-in-washington/>
- Larsson, P., de Souza, J. B. R., & Begnert, J. (2023). An Auditory Display for Remote Road Vehicle Operation That Increases Awareness and Presence. In M. Weger, T. Ziemer & N. Rönnerberg (Hrsg.), *Sonification for the masses* (S. 113–120). The International Community for Auditory Display; Georgia Tech Library. <https://doi.org/10.21785/icad2023.8296>

- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Le, K. D., Nguyen, H. D., Ranmuthugala, D., & Forrest, A. (2016). Artificial potential field for remotely operated vehicle haptic control in dynamic environments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 230(9), 962–977. <https://doi.org/10.1177/0959651816660484>
- Lee, J., Yi, K., Lee, D., Jang, B., Kim, M., & Hwang, S. (2020). Haptic control of steer-by-wire systems for tracking of target steering feedback torque. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(5), 1389–1401. <https://doi.org/10.1177/0954407019879298>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lin Zhao. (2023). *Teleoperation and the influence of driving feedback on drivers' behaviour and experience* [Diss., Unpublished]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21612.85128>
- Linné, P. A., & Andersson, J. (2021). Regulating Road Vehicle Teleoperation: Back to the Near Future. *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*, 135–140. <https://doi.org/10.1109/IVWorkshops54471.2021.9669226>
- Liu, R., Kwak, D., Devarakonda, S., Bekris, K., & Iftode, L. (2017). Investigating Remote Driving over the LTE Network. In I. Politis (Hrsg.), *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (S. 264–269). ACM. <https://doi.org/10.1145/3122986.3123008>
- 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. <https://doi.org/10.1080/10447318.2019.1574059>
- Lu, S., Zhong, R., & Shi, W. (2022). Teleoperation Technologies for Enhancing Connected and Autonomous Vehicles. *2022 IEEE 19th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS)*, 435–443. <https://doi.org/10.1109/MASS56207.2022.00068>
- Lucas, G., Kemeny, A., Paillot, D., & Colombet, F. (2020). A simulation sickness study on a driving simulator equipped with a vibration platform. *Transpor-*

- tation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 68, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.11.011>
- Luciani, A. (2004). Dynamics as common criterion to enhance the sense of presence in virtual environments. *Presence* 2004.
- Lundbäck, M. (2022). Roadmap for teleoperation and automation of forwarding. *PhD Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences*.
- Luo, J., He, W., & Yang, C. (2020). Combined perception, control, and learning for teleoperation: key technologies, applications, and challenges. *Cognitive Computation and Systems*, 2(2), 33–43. <https://doi.org/10.1049/ccs.2020.0005>
- Luo, Y., Wang, J., Shi, R., Liang, H.-N., & Luo, S. (2022). In-Device Feedback in Immersive Head-Mounted Displays for Distance Perception During Teleoperation of Unmanned Ground Vehicles. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(1), 79–84. <https://doi.org/10.1109/TOH.2021.3138590>
- Majstorovic, D., & Diermeyer, F. (2023). Dynamic Collaborative Path Planning for Remote Assistance of Highly-Automated Vehicles [29.08.2023]. <http://arxiv.org/pdf/2308.15167>
- Majstorovic, D., Hoffmann, S., Pfab, F., Schimpe, A., Wolf, M.-M., & Diermeyer, F. (2022). Survey on Teleoperation Concepts for Automated Vehicles. *2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 1290–1296. <https://doi.org/10.1109/SMC53654.2022.9945267>
- Mansour, C., Shammas, E., Elhajj, I. H., & Asmar, D. (2012). Dynamic bandwidth management for teleoperation of collaborative robots. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2012)*, 1861–1866. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491239>
- Maran, F. (2013). Model-based control techniques for automotive applications. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110148217>
- Marquez-Barja, J. M., Hadiwardoyo, S., Lannoo, B., Vandenberghe, W., Kenis, E., Deckers, L., Campodonico, M. C., dos Santos, K., Kusumakar, R., Klepper, M., & Vandenbossche, J. (2021). Enhanced Teleoperated Transport and Logistics: A 5G Cross-Border Use Case. *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, 229–234. <https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482459>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Trans. Information Systems*, vol. E77-D, no. 12, 1321–1329.
- Mohellebi, H., Kheddar, A., & Espie, S. (2009). Adaptive Haptic Feedback Steering Wheel for Driving Simulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(4), 1654–1666. <https://doi.org/10.1109/TVT.2008.2004493>
- Mok, B., Johns, M., Miller, D., & Ju, W. (2017). Tunneled In: Drivers with Active Secondary Tasks Need More Time to Transition from Automation. In G. Mark

- (Hrsg.), *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 2840–2844). ACM. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025713>
- Molino, M., Cortese, C. G., & Ghislieri, C. (2020). The Promotion of Technology Acceptance and Work Engagement in Industry 4.0: From Personal Resources to Information and Training. *International journal of environmental research and public health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072438>
- Murgovski, N. (2007). *Vehicle modelling and washout filter tuning for the Chalmers Vehicle Simulator* [Diss.].
- 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), 9. <https://doi.org/10.1186/s41235-021-00271-8>
- Nakamura, E. (2021). Signal Time-Delay Tolerance in Teleoperated Vehicles. *2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 770–773. <https://doi.org/10.1109/GCCE53005.2021.9622069>
- Nasry, H., Xu, W., Gong, J. W., & Chen, H. Y. (2013). Teleoperation Transparency Using Model Predictive Control. *Applied Mechanics and Materials*, 446–447, 1151–1155. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1151>
- Neumann, Sven Winkelhaus, Eric H. Grosse & Christoph H. Glock. (2021). Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, 107992. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>
- Neumeier, S., Bajpai, V., Neumeier, M., Facchi, C., & Ott, J. (2022). Data Rate Reduction for Video Streams in Teleoperated Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 19145–19160. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3171718>
- Neumeier, S., Wintersberger, P., Frison, A.-K., Becher, A., Facchi, C., & Riener, A. (2019). Teleoperation. *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 186–197. <https://doi.org/10.1145/3342197.3344534>
- Next Move Startegy Consulting. (2023). Number of autonomous vehicles globally 2022-2030 [10.08.2024]. <https://www.statista.com/statistics/1230664/projected-number-autonomous-cars-worldwide/>
- Nguyen, B.-H., & Ryu, J.-H. (2010). Design of a master device for the teleoperation of wheeled and tracked vehicles. *ICCAS 2010*, 1643–1648. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5669650>
- Noah Goodall. (2020). Non-technological challenges for the remote operation of automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 142, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.024>

- Opiyo, S., Zhou, J., Mwangi, E., Kai, W., & Sunusi, I. (2021). A Review on Teleoperation of Mobile Ground Robots: Architecture and Situation Awareness. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(3), 1384–1407. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0999-z>
- Óscar Silva, Rubén Cordera, Esther González-González & Soledad Nogués. (2022). Environmental impacts of autonomous vehicles: A review of the scientific literature. *Science of The Total Environment*, 830, 154615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154615>
- Ottesen. (2014). Situation Awareness in Remote Operation of Autonomous Ships. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197677524>
- Ouden, J., Ho, V., van der Smagt, T., 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 Transportation*, 2. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2021.801567>
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part A, Systems and humans : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Parida, V., Sjödin, D., & Reim, W. (2019). Reviewing Literature on Digitalization, Business Model Innovation, and Sustainable Industry: Past Achievements and Future Promises. *Sustainability*, 11(2), 391. <https://doi.org/10.3390/su11020391>
- Phantom Auto. (2024). Drivers can work remotely, too. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://phantom.auto/>
- Prakash, J., Vignati, M., Arrigoni, S., Bersani, M., & Mentasti, S. (2020). Teleoperated Vehicle-Perspective Predictive Display Accounting for Network Time Delays. *21st International Conference on Advanced Vehicle Technologies/16th International Conference on Design Education*. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-98159>
- Prakash, J., Vignati, M., & Sabbioni, E. (2023). Vehicle Teleoperation: Performance Assessment of SRPT Approach Under State Estimation Errors [19.05.2023]. <http://arxiv.org/pdf/2305.11674>
- Prakash, J., Vignati, M., Vignarca, D., Sabbioni, E., & Cheli, F. (2023). Predictive Display With Perspective Projection of Surroundings in Vehicle Teleoperation to Account Time-Delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(9), 9084–9097. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3268756>
- Queck, E., Cedl, K., & Kutter, S. (2022). Teleoperation: Grundlagen und Einsatzszenarien. In S. Leonhardt, T. Neumann, D. Kretz, T. Teich & M. Bodach (Hrsg.),



- Innovation und Kooperation auf dem Weg zur All Electric Society* (S. 195–209). Springer Gabler. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-38706-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-658-38706-8_10)
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). How Traffic Situations and Non-Driving Related Tasks Affect the Take-Over Quality in Highly Automated Driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 2063–2067. <https://doi.org/10.1177/1541931214581434>
- Rampersad, G. (2020). Robot will take your job: Innovation for an era of artificial intelligence. *Journal of Business Research*, 116, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.019>
- Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819–829. <https://doi.org/10.1177/014107687807101109>
- Ren, R., Wang, W., Liu, J., Li, Y., & Wang, L. (2016). Teleoperation of unmanned ground vehicles based on 3D trajectory prediction. In B. Xu (Hrsg.), *Proceedings of 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC 2016)* (S. 790–794). IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867318>
- Rodriguez, N., Jessel, J.-P., & Torguet, P. (2002). A Virtual Reality Tool for Teleoperation Research. *Virtual Reality*, 6(2), 57–62. <https://doi.org/10.1007/s100550200006>
- SAE J3016. (2021). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. [https://doi.org/10.4271/J3016\\_202104](https://doi.org/10.4271/J3016_202104)
- Salvi, Aniket. (2022). Operational Design Domain - Enger Rahmen sorgt für Sicherheit (Magazin des Fraunhofer-Instituts für Kognitive Systeme IKS, Hrsg.). Verfügbar 5. Juni 2024 unter <https://safe-intelligence.fraunhofer.de/artikel/odd-enger-rahmen-sorgt-fuer-sicherheit>
- Sandvik. (2024). Sandvik mining automation and teleoperation systems. <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/technology/automation/>
- Saparia, S., Schimpe, A., & Ferranti, L. (2021). Active Safety System for Semi-Autonomous Teleoperated Vehicles. <http://arxiv.org/pdf/2106.14554>
- Sato, Y., Kashiara, S., & Ogishi, T. (2021). Implementation and Evaluation of Latency Visualization Method for Teleoperated Vehicle. *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IV48863.2021.9575817>
- Schaller Consulting. (2006). The New York City Taxicab Fact Book. Verfügbar 20. August 2024 unter <http://www.schallerconsult.com/taxi/taxifb.pdf>

- Schimpe, A., Feiler, J., Hoffmann, S., Majstorovic, D., & Diermeyer, F. (2022). Open Source Software for Teleoperated Driving. *ICCVE 2022 conference proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCVE52871.2022.9742859>
- Schitz, D., Bao, S., Rieth, D., & Aschemann, H. (2021). Shared Autonomy for Teleoperated Driving: A Real-Time Interactive Path Planning Approach. *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 999–1004. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561918>
- Schitz, D., Graf, G., Rieth, D., & Aschemann, H. (2021a). Interactive Corridor-Based Path Planning for Teleoperated Driving. In C. Tian, H. Tan & Q. Wu (Hrsg.), *2021 the 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering* (S. 174–179). IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/ICMRE51691.2021.9384848>
- Schitz, D., Graf, G., Rieth, D., & Aschemann, H. (2021b). Model-Predictive Cruise Control for Direct Teleoperated Driving Tasks. *2021 European Control Conference (ECC)*, 1808–1813. <https://doi.org/10.23919/ECC54610.2021.9655187>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihni, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schwindt, S., Heller, A., Theobald, N., & Abendroth, B. (2023). Who Will Drive Automated Vehicles? - Usability Context Analysis and Design Guidelines for Future Control Centers for Automated Vehicle Traffic. <https://doi.org/10.26083/TUPRINTS-00026342>
- Skogforsk. (2024). 5G utrustad drönare fjärrstyr skogsmaskin. Verfügar 8. August 2024 unter <https://www.youtube.com/watch?v=7mbzAeqgIqk>
- Sungjun Park, Seo, C., Kim, J.-P., & Ryu, J. (2010). An energy-bounding approach to rate-mode bilateral teleoperation of remote vehicles in constant time-delayed environments. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5806–5811. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651575>
- Tandon, A., Brudnak, M. J., Stein, J. L., & Ersal, T. (2014). An Observer Based Framework to Improve Fidelity in Internet-Distributed Hardware-in-the-Loop Simulations. *ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference - Volume 2: Control, Monitoring, and Energy Harvesting of Vibratory Systems; Cooperative and Networked Control; Delay Systems; Dynamical Modeling and Diagnostics in Biomedical Systems; Estimation and Id of Energy Systems; Fault Detection; Flow and Thermal Systems; Haptics and Hand Motion; Human Assistive Systems and Wearable Robots; Instrumentation and Characterization in Bio-Systems; Intelligent Transportation Systems; Linear Systems and Robust Control; Marine Vehicles; Nonholonomic Systems*. <https://doi.org/10.1115/DSCC2013-3878>

- Tang, T., Kurkowski, J., & Lienkamp, M. (2013). Teleoperated Road Vehicles: A Novel Study on the Effect of Blur on Speed Perception. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(9), 333. <https://doi.org/10.5772/56735>
- Thorpe, J. S. K., & Thorpe, C. E. (1995). Operator Interface Design Issues in a Low-Bandwidth and High-Latency Vehicle Teleoperation System. *SAE Transactions*, 104, 487–493. <http://www.jstor.org/stable/44611951>
- Tyagi, R., & Mascaro, S. (2018). Omnidirectional Force Feedback for Teleoperation of Omnidirectional Wheeled Robots. *Proceedings of the ASME 11th Annual Dynamic Systems and Control Conference - 2018*. <https://doi.org/10.1115/DSCC2018-9122>
- Tyczka, D. R., Wright, R., Janiszewski, B., Chatten, M. J., Bowen, T. A., & Skibba, B. (2012). Study of high-definition and stereoscopic head-aimed vision for improved teleoperation of an unmanned ground vehicle. *Unmanned Systems Technology XIV*, 83870L. <https://doi.org/10.1117/12.916976>
- UNECE. (2020). Report of the Global Forum for Road Traffic Safety on its eighty-first session: Amendments to Article 1 and new Article 34bis 1968 Convention on Road Traffic. <https://unece.org/sites/default/files/2021-01/ECE-TRANS-WP.1-173-Add1e.pdf>
- UNECE. (2022). Informal paper on remote driving: (ECE/TRANS/WP.1rev/2021) (UNECE, Hrsg.).
- United Nations. (1968). Convention on Road Traffic (UN, Hrsg.). <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/crt1968e.pdf>
- Van Ende, K. T. R., Schaare, D., Kaste, J., Küçükay, F., Henze, R., & Kallmeyer, F. K. (2016). Practicability study on the suitability of artificial, neural networks for the approximation of unknown steering torques. *Vehicle System Dynamics*, 54(10), 1362–1383. <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1202987>
- Vasilijevic, A., Jambrosic, K., & Vukic, Z. (2018). Teleoperated path following and trajectory tracking of unmanned vehicles using spatial auditory guidance system. *Applied Acoustics*, 129, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.001>
- Vay. (2024). Vay. Verfügbar 23. Juli 2024 unter <https://vay.io/>
- Vozar, S., & Tilbury, D. M. (2012). Improving UGV teleoperation performance using novel visualization techniques and manual interfaces. *Unmanned Systems Technology XIV*, 838716. <https://doi.org/10.1117/12.918700>
- Wang, L., & Wang, G. (2016). Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 6, 1–8. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:46039409>
- Wang, S.-C., & Fu, L.-C. (2004). Predictive washout filter design for VR-based motion simulator. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and*

- Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, 7, 6291–6295 vol.7. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1401387>
- Waymo. (2023). Making green transportation accessible. Verfügbar 27. August 2024 unter <https://waymo.com/blog/2023/08/making-green-transportation-accessible/>
- Waymo. (2024). The world’s first autonomous ride-hailing service. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://waymo.com/>
- Winfield, A., & Bsc. (2009). Future Directions in Tele-operated Robotics. [https://www.researchgate.net/publication/267260583\\_Future\\_Directions\\_in\\_Tele-operated\\_Robotics/citations](https://www.researchgate.net/publication/267260583_Future_Directions_in_Tele-operated_Robotics/citations)
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yang, E., & Dorneich, M. C. (2017). The Emotional, Cognitive, Physiological, and Performance Effects of Variable Time Delay in Robotic Teleoperation. *International Journal of Social Robotics*, 9(4), 491–508. <https://doi.org/10.1007/s12369-017-0407-x>
- Yu, M.-Y., Vasudevan, R., & Johnson-Roberson, M. (2019). Occlusion-Aware Risk Assessment for Autonomous Driving in Urban Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 2235–2241. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2900453>
- Yun, H., Cho, Y., Ha, A., & Yun, J. (2023). Driving with Black Box Assistance: Teleoperated Driving Interface Design Guidelines for Computational Driver Assistance Systems in Unstructured Environments. *Proceedings of the 15th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 156–166. <https://doi.org/10.1145/3580585.3607169>
- Yurtsever, E., Lambert, J., Carballo, A., & Takeda, K. (2020). A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. *IEEE Access*, 8, 58443–58469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983149>
- Zhang, H., Shi, Y., Wang, J., & Chen, H. (2018). A New Delay-Compensation Scheme for Networked Control Systems in Controller Area Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), 7239–7247. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2795574>
- Zhang, Q., Zhong, H., Cui, J., Ren, L., & Shi, W. (2021). AC4AV: A Flexible and Dynamic Access Control Framework for Connected and Autonomous Vehicles. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1946–1958. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3016961>

- Zhang, T. (2020). Toward Automated Vehicle Teleoperation: Vision, Opportunities, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(12), 11347–11354. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3028766>
- Zhao, L., Nybacka, M., Aramrattana, M., Rothhämel, M., Habibovic, A., Drugge, L., & Jiang, F. (2024). Remote Driving of Road Vehicles: A Survey of Driving Feedback, Latency, Support Control, and Real Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1–22. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3362597>
- Zhao, L., Nybacka, M., Drugge, L., Mårtensson, J., Vyas, S., Savant, C., Zhang, W., & Palmberg, R. (2022). Study of Different Steering Feedback Models Influence During Remote Driving. In A. Orlova & D. Cole (Hrsg.), *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II* (S. 836–853). Springer International Publishing; Imprint Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_78)
- Zhao, L., Nybacka, M., Drugge, L., Rothhämel, M., Habibovic, A., & Hvitfeldt, H. (2024). The Influence of Motion-Cueing, Sound and Vibration Feedback on Driving Behavior and Experience – A Virtual Teleoperation Experiment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3353465>
- Zhao, L., Nybacka, M., & Rothhämel, M. (2023). A Survey of Teleoperation: Driving Feedback. *IEEE IV 2023*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186553>
- Zhao, L., Nybacka, M., Rothhämel, M., & Drugge, L. (2023). Influence of sound, vibration, and motion-cueing feedback on driving experience and behaviour in real-life teleoperation.
- Zhao, L., Nybacka, M., Rothhämel, M., Habibovic, A., Papaioannou, G., & Drugge, L. (2024). Driving Experience and Behavior Change in Remote Driving: An Explorative Experimental Study. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(2), 3754–3767. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3344890>
- Zheng, J. M., Chan, K. W., & Gibson, I. (1998). Virtual reality. *IEEE Potentials*, 17(2), 20–23. <https://doi.org/10.1109/45.666641>
- Zheng, Y., Brudnak, M. J., Jayakumar, P., Stein, J. L., & Ersal, T. (2016). An Experimental Evaluation of a Model-Free Predictor Framework in Teleoperated Vehicles\*\*This work was supported by the Automotive Research Center (ARC) in accordance with Cooperative Agreement W56HZV-14-2-0001 U.S. Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center (TARDEC) Warren, MI. UNCLASSIFIED: Distribution Statement A. Approved for public release. #27479. *IFAC-PapersOnLine*, 49(10), 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.513>

- Zhou, J. (2013). Digitalization and intelligentization of manufacturing industry. *Advances in Manufacturing*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s40436-013-0006-5>
- Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celent, L. (2022). From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. *Energies*, 15(14), 5221. <https://doi.org/10.3390/en15145221>
- Zoox. (2024). Zoox. Verfügbar 8. August 2024 unter <https://zoox.com/>