

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

**Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung
mittels Teleassistenz**

Johannes Paul Feiler, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering und Design der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Sonja Berensmeier

Prüfer*innen der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr. H. Bubb

Die Dissertation wurde am 20.09.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 07.12.2022 angenommen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts UNICARagil von 2017 bis 2021.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, der mir die Möglichkeit zur Promotion gab. Ich bedanke mich für das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die Entscheidungsfreiheit bei der Gestaltung des Projektes. Auch meinem Zweitprüfer Prof. Dr. rer. nat. habil. Heiner Bubb danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Ratschläge. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Prof. Dr. Sonja Berensmeier.

Eine großartige Hilfe waren auch die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik. Mein besonderer Dank gilt hier meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Frank Diermeyer für die Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen. Unvergessen bleibt die gemeinsame Zeit mit meinen Projektkollegen Jean-Michael Georg, Simon Hoffmann, Andreas Schimpe, Domagoj Majstorovic und Florian Pfab. Die gemeinsame Neuentwicklung des Softwarestacks, die Arbeit am Versuchsträger und die vielen ausgiebigen Diskussionen werden mir stets in sehr guter Erinnerung bleiben. Die bedingungslose gegenseitige Unterstützung hat maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Außerdem gebührt meinem Mentor Dr.-Ing. David Wittmann ein besonderer Dank, insbesondere für die fortwährende Unterstützung und die bereichernden Diskussionen.

Den Festangestellten des FTM, insbesondere Florian Biechl, Sylvia Brinkmann, Christiane Schulte, Nina Julius und Bettina von Stokar danke ich für Ihren unermüdlichen Einsatz. Ein großer Dank geht an meine Studenten und Hilfskräfte, die mich bei der Durchführung des Projektes in allen Phasen tatkräftig unterstützten.

Meiner Familie, insbesondere meiner Frau, meinen Eltern und meinen Brüdern, gebührt der größte Dank. Ihr habt mich in all meinen Vorhaben bestärkt und immer unterstützt. Ich danke Euch für Euren fortwährenden Rückhalt.

Garching, im September 2022

Johannes Feiler

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Automatisiertes Fahren	4
2.1.1 Systemaufbau	4
2.1.2 Unzulänglichkeiten.....	6
2.1.3 Wahrnehmung	8
2.2 Fernsteuerung von Straßenfahrzeugen	8
2.2.1 Definition der Teleoperation und der Teleassistenz.....	9
2.2.2 Steuerungsarten	9
2.2.3 Latenzzeiten der Teleoperation	13
2.2.4 Teleoperation im Kontext der Leitwarte	14
2.3 Menschliche Informationsverarbeitungsmodelle.....	15
2.3.1 Definition der Beanspruchung	16
2.3.2 Sequentielle Modelle.....	16
2.3.3 Kapazitätsmodelle	17
2.4 Mentale Beanspruchung.....	19
2.4.1 Leistungseinbußen durch Überbeanspruchung	19
2.4.2 Minderung des Situationsbewusstseins durch Überbeanspruchung	20
2.4.3 Messverfahren der mentalen Beanspruchung	21
2.4.4 Mentale Beanspruchung bei Teleoperation	26
2.4.5 Akzeptale mentale Beanspruchung	26
2.5 Menschliche Wahrnehmung.....	27
2.5.1 Anatomische Grundlagen des Sehens	27

2.5.2	Bewegungssehen	27
2.5.3	Eigenbewegungswahrnehmung	28
2.5.4	Tiefenwahrnehmung	28
2.5.5	Auswirkungen der Latenzzeiten auf die Teleoperationsleistung.....	29
2.6	Ableitung der Forschungsfragen aus dem Stand der Wissenschaft	30
3	Methodik.....	33
4	Analyse des Anwendungsgebiets der Teleoperation	40
4.1	Herausfordernde Szenarien für automatisierte Fahrzeuge	40
4.1.1	Ungewöhnliches Objekt	40
4.1.2	Blockierendes Objekt.....	41
4.1.3	Einsatzfahrzeug-Regelbruch	41
4.1.4	Deadlock Szenario.....	41
4.1.5	Lokalisierungsfehler	42
4.1.6	Änderungen im Bewegungsmodell	42
4.1.7	Vorsätzliche Angriffe auf die Sensoren und die Planung.....	42
4.2	Mittels Teleoperation lösbare Szenarien.....	42
5	Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups	44
5.1	Ziel und Aufgaben der Fahrzeugführung.....	44
5.2	Zuordnung der Fahrzeugführungsaufgaben zu Wickens Ressourcen	44
5.3	Veränderungen der menschlichen Wahrnehmung durch die Teleoperation .	47
5.4	Auswirkungen der Veränderungen auf die Ressourcennutzung	49
5.5	Ergebnisse der Beanspruchungsanalyse.....	51
6	Entwicklung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung.....	52
6.1	Relevanz von Szenario-spezifischen Teleoperationsarten	52
6.2	Methodik der Modifizierung zur Beanspruchungsreduktion	53
6.3	Anforderungen.....	53
6.4	Konzept und Systemstruktur	54
6.4.1	Verantwortungsteilung	55
6.4.2	Funktionsgrenze	56
6.5	Umsetzung und verwendete Algorithmen	56
6.5.1	Umsetzung.....	56
6.5.2	Bedienung.....	57
6.5.3	Automatisierte Fahrfunktion	57
7	Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung	58

7.1	Schulung der Versuchspersonen	58
7.1.1	Lernziele	58
7.1.2	Einordnung in die Lehrtaxonomie	59
7.1.3	Lehrkonzept	60
7.1.4	Schulungsaufbau und Schulungsablauf	61
7.2	Operationalisierung der mentalen Beanspruchung.....	62
7.2.1	Leistungsbasierte Messung	62
7.2.2	Physiologische Messung	62
7.2.3	Subjektive Messung.....	71
7.3	Studie zur Bewertung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung ...	71
7.3.1	Zielsetzung und Hypothesenbildung.....	71
7.3.2	Experimentelles Design und Versuchsablauf	72
7.3.3	Versuchsaufbau	73
7.3.4	Versuchsszenarien	75
7.3.5	Probandenvorbereitung und -kollektiv	76
7.3.6	Datenaufbereitung	78
7.3.7	Ergebnisse	81
7.3.8	Diskussion der Studie	88
7.4	Diskussion der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung.....	94
7.4.1	Konformität mit dem Gesetz zum autonomen Fahren	94
7.4.2	Verbesserung der Darstellung	94
7.4.3	Entwicklung ähnlicher Modifizierungen.....	95
8	Zusammenfassung und Ausblick	96
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis.....	v
	Literaturverzeichnis.....	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxv
	Anhang	xxvii

Abkürzungsverzeichnis

AF	Automatisiertes Fahrzeug
DALI	Driving Activity Load Index
DS	Direkte Steuerung
EEG	Elektronenzephalografie
EKG	Elektrokardiogramm
HLW	Hautleitwert
HRV	Herzratenvariabilität
MMW	Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$d_{j,i}$	-	DALI (Driving Activity Load Index) der j-ten Steuerungsart und der i-ten Versuchsperson
f_{HR}	$\frac{1}{min}$	Frequenz der Hautleitwertreaktionen
$f_{HR, j}$	$\frac{1}{min}$	Frequenz der Hautleitwertreaktionen der j-ten Steuerungsart
$f_{HR, min, i}$	$\frac{1}{min}$	Minimale Frequenz der Hautleitwertreaktionen der i-ten Versuchsperson
η^2	-	Effektgröße
p	-	Wahrscheinlichkeit
σ_{HP}	ms	Standardabweichung der RR-Intervalle
$\Phi_{d, i}$	-	Relative Verbesserung des DALI der i-ten Versuchsperson
$\Phi_{HR, i}$	-	Relative Verbesserung der Frequenz der Hautleitwertreaktionen i-ten Versuchsperson
$X_{i, j, norm}$	-	Normierte physiologische Kenngröße x der i-ten Versuchsperson und der j-ten Steuerungsart
$X_{i, max}$	-	Maximale physiologische Kenngröße x der i-ten Versuchsperson
$X_{i, min}$	-	Minimale physiologische Kenngröße x der i-ten Versuchsperson

1 Einleitung

Die Entwicklung des automatisierten Fahrens macht große Fortschritte. Mercedes-Benz [1] erhielt im Dezember 2021 als erstes Automobilunternehmen für ein automatisiertes Spurhalteassistenzsystem die Genehmigung nach der UN-Regelung Nr. 157 [2]. Das zunächst nur in Deutschland verfügbare Level-3 System nach SAE [3] agiert auf Autobahnen bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h selbständig. Im innerstädtischen Bereich bietet Waymo seit 2018 den selbstfahrenden Fahrdienst Waymo One an [4]. Dieser Fortschritt wird für einen weiteren Wandel der Individualmobilität sorgen.

1.1 Motivation

Die leitende Motivation für die Entwicklung der Teleoperation, das Steuern eines Fahrzeugs aus der Ferne, ist die Unterstützung und beschleunigte Einführung automatisierter Fahrzeuge (AF). Die Szenariovielfalt im alltäglichen Straßenverkehr übersteigt die Funktionalität aktueller Automatisierungen. In solchen Szenarien oder bei einem Systemfehler wird von den AF erwartet, dass sie in einen risikominimalen Zustand (Stillstand) übergehen [3, S. 15]. Die Teleoperation bietet die Möglichkeit, das AF aus diesem Stillstand heraus zu bewegen und das Szenario aufzulösen. Anschließend kann das AF seine Fahrt selbständig fortsetzen. Die Teleoperation steigert folglich die Einsatzhäufigkeit der AF.

In strukturierteren und weniger komplexen Umgebungen macht die Teleoperation den Übergang zur automatisierten, fahrerlosen Anwendung möglich. Beispiele sind Projekte von Fernride [5], in denen die firmeninterne Produktionsbelieferung oder die Logistik an Rangierbahnhöfen mittels direkter Teleoperation dargestellt wird. Das amerikanische Startup Phantom Auto fokussiert sich auf die Kombination aus direkter Teleoperation und Automatisierung im Bereich der Gabelstapler und Lieferroboter [6]. Das Berliner Teleoperation-Startup Vay strebt einen teleoperierten Taxidienst bis Ende 2022 an, bei dem automatisierte Notbremsfunktionen die Rückfallebene für den Operator darstellen sollen und auf Basis der Teleoperationsdaten das automatisierte System laufend verbessert werden soll [7]. Das amerikanische Unternehmen Zoox entwickelt für ihre automatisierten Fahrzeuge einen TeleGuidance-Dienst, der automatisierten Fahrzeugen Anweisungen in kritischen Situationen geben kann [8]. Waymo plant, über ein Remote Service Center den AF Zusatzinformationen zukommen zu lassen, nicht jedoch die Fahrfunktion betreffende Anweisungen direkt zu erteilen [9].

Mittels AF ist es möglich, die Verkehrssicherheit, den Komfort und das Mobilitätsangebot zu erweitern. Dem globalen Statusbericht der World Health Organization zur Straßenverkehrssicherheit zufolge sank die Zahl der Verkehrstoten pro 100.000 Einwohner von 18,8 im Jahr 2000 auf 18,2 im Jahr 2016 [10, S. 4]. Diese prozentuale Reduktion von 3,2 % innerhalb von 16 Jahre bedeutet aufgrund des Bevölkerungswachstums absolut gesehen eine Zunahme an Verkehrstoten auf einem inakzeptabel hohen Niveau. Als Hauptunfallursache wird meist menschliches

Fehlverhalten angeführt, dessen Anteil je nach Studie zwischen 93 % und 99 % beträgt [11, S. 24, 12, S. 2]. Die wesentlichen Gründe menschlichen Fehlverhaltens dabei sind Ablenkung, zu hohe Geschwindigkeit oder Alkoholeinfluss. AF haben deswegen das Potential, die Unfallzahlen zu reduzieren.

Die Teleoperation stellt zusammenfassend in unterschiedlichen Ausprägungen und Konzepten die Möglichkeit dar, AF schneller in ihre Anwendung zu bringen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Teleoperation mittels der direkten Steuerung (DS) beansprucht Operatoren mental [13, S. 5]. Die DS bezeichnet eine Steuerungsart, bei der der Operator das entfernte Fahrzeug direkt über die Vorgabe eines Lenkradwinkels und einer Geschwindigkeit oder eines Beschleunigungswunsches steuert. In Kapitel 2.4.4 wird näher ausgeführt, dass auch in anderen Anwendungsgebieten der DS dieselbe Erfahrung gemacht wird. Auf Dauer führt die mentale Beanspruchung zu einer Überbeanspruchung [14, S. 23]. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Steuerungsart zu entwickeln, die die Operatoren weniger stark beansprucht, und diese frei zur Verfügung zu stellen. Die Steuerungsart hat den Anspruch, technische Funktionsgrenzen eines AF direkt am Kern der Entstehung zu überwinden.

Diese Arbeit bewertet diese Entwicklung unter dem Gesichtspunkt der mentalen Beanspruchung von Operatoren und vergleicht sie mit der DS. Darüber hinaus leitet diese Arbeit theoriebasiert her, wie mentale Beanspruchung bei der Teleoperation erzeugt wird, damit zukünftige Entwicklungen diese Zusammenhänge berücksichtigen können. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf den Anwendungsfall innerstädtischer, automatisierter Fahrzeuge.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Abbildung 1.1 ist die Struktur dieser Arbeit abgebildet. Im Anschluss an die Einleitung beschreibt der Stand der Wissenschaft (Kapitel 2) zum einen vor allem technische Aspekte im Bereich des Automatisierten Fahrens und der Teleoperation. Zum anderen werden die menschliche Kognition und Wahrnehmung beschrieben. Aus der sich anschließenden Diskussion zum Stand der Wissenschaft werden Forschungsfragen abgeleitet.

Im Kapitel 3 wird die mehrstufige Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen vorgestellt und begründet. Die sich anschließenden Kapitel folgen den Schritten dieser Vorgehensweise. Dazu wird in Kapitel 4 das Anwendungsgebiet der Teleoperation als Unterstützungsdienst für das AF im innerstädtischen Bereich analysiert. In Kapitel 5 wird die Entstehung der mentalen Beanspruchung während der Teleoperation mit Hilfe der Multiplen-Ressourcen-Theorie und Randbedingungen durch das Teleoperationssetup hergeleitet. Kapitel 6 stellt das Konzept und die Entwicklung der Steuerungsart „Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung“ vor. Anschließend wird in Kapitel 7 anhand einer Probandenstudie mit geschulten Versuchspersonen die Entwicklung untersucht, ausgewertet und diskutiert. Kapitel 8 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf relevante, zukünftige Untersuchungsgegenstände der Teleoperation.

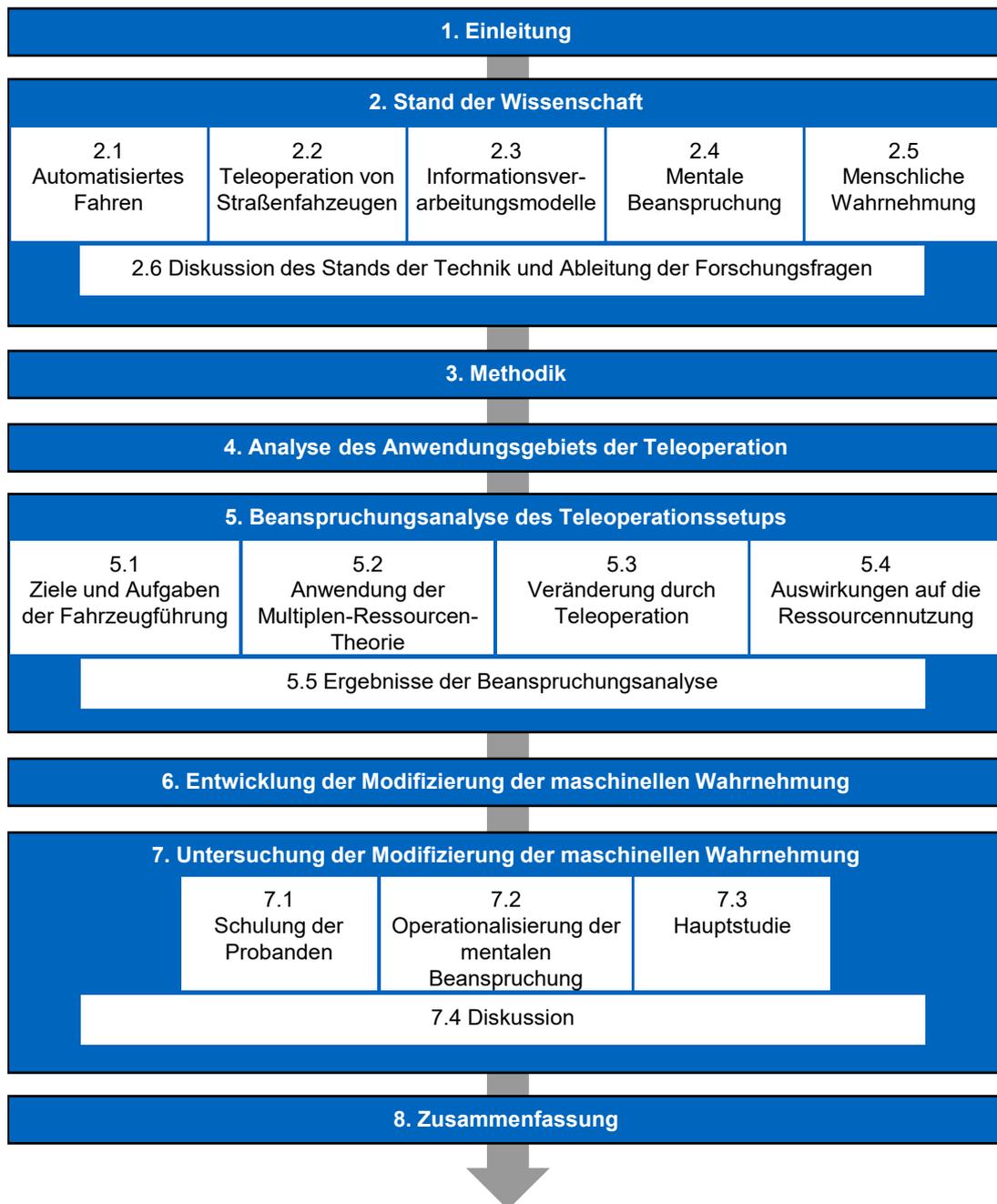


Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

2 Stand der Technik

2.1 Automatisiertes Fahren

2.1.1 Systemaufbau

Die derzeitigen Ansätze zur Automatisierung von Fahrfunktionen lassen sich im Wesentlichen in die zwei Architekturen der End-to-End-Automatisierung [15–19] und der modularen Sense-Plan-Act-Architektur [20–25] unterteilen. Aufgrund der Modularität der Sense-Plan-Act-Architektur und der Herausforderungen der Absicherbarkeit von End-to-End-Automatisierungen [26, S. 13] ist die Sense-Plan-Act-Architektur die häufiger genutzte Architektur. Sense-Plan-Act stammt aus der Robotik und hatte in ihrer ursprünglichen Ausprägung einige Nachteile. Dazu zählte im Wesentlichen die strikt sequentielle Verarbeitung, die während der Ausführung kein Sensing zuließ [27, S. 189]. Sie ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

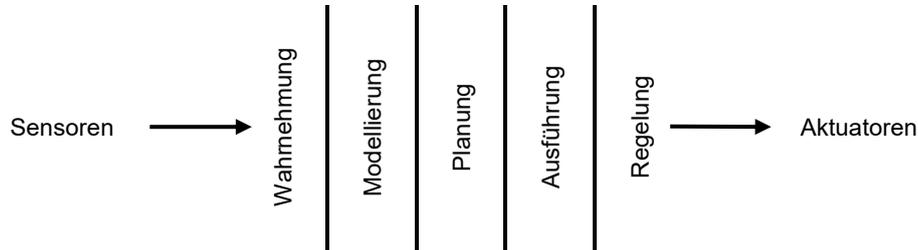


Abbildung 2.1: Sense-Plan-Act-Architektur nach Brooks [28, S. 14]

Aktuell wird bei automatisierten Fahrzeugen eine Sense-Plan-Act-Architektur verwendet, die diese Nachteile umgeht, indem sie je nach Funktion parallel unterschiedliche Sense-Plan-Act-Schleifen in den passenden Wiederholungsraten verwendet [29, S. 87]. Eine Open-Source-Implementierung wird zum Beispiel von der Autoware Foundation angeboten [30], wie sie in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Jedes der Module in der Sense-Plan-Act-Architektur spiegelt ein eigenes Forschungsgebiet wider. Um die Relevanz der Sense-Plan-Act-Architektur weiter zu verdeutlichen, ist zu erwähnen, dass bereits eine ETSI-Norm zum kollektiven Wahrnehmungsdienst existiert, die Nachrichten mit Inhalten der Wahrnehmung für V2X-Kommunikation standardisiert [31]. Nachrichten mit Inhalten der Wahrnehmung setzen eine modulare Sense-Plan-Act-Architektur voraus.

In Wissenschaft und Wirtschaft sind unterschiedliche Softwarearchitekturen für automatisierte Fahrzeuge bekannt. Im Allgemeinen sind die von Unternehmen verwendeten Architekturen nicht öffentlich. Während die Sense-Plan-Act-Architektur weit verbreitet ist, kann sich ihre Ausgestaltung im Detail von Fall zu Fall unterscheiden. Eine tiefere Analyse von Architekturen automatisierter Fahrzeuge findet sich in einer Veröffentlichung von Taş [32].

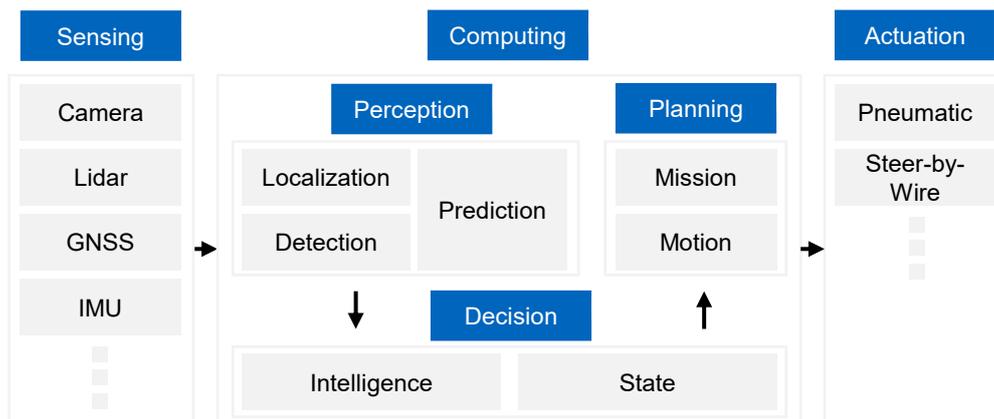


Abbildung 2.2: Autoware-AI Übersicht Software-Stack nach Biggs [33].

Im Folgenden werden die Funktionen der wesentlichen Autoware AI Module vorgestellt. Das Sensing ist die Schnittstelle zur Sensorik des automatisierten Fahrzeugs und übermittelt die benötigten Sensorsignale. Das Perception-Modul liefert eine Schätzung der eigenen Fahrzeugposition, eine Erkennung des Umfelds, die Positionsverläufe der erkannten Verkehrsteilnehmer und deren Prädiktion. Zur Bestimmung des freien Fahrkorridors kann eine dynamische Occupancy-Grid-Map verwendet werden [34]. Im Autoware AI Package wird dieses Modul „Road Occupancy Processor“ genannt, das den Freiraumbereich der Straße bestimmt. Das Decision-Modul erzeugt ein Fahrverhalten, dem entsprechend ein passender Planer ausgewählt wird. Beispiele für Fahrverhalten sind das Geradeausfahren, Linksabbiegen oder eine Notbremsung. Das Planning-Modul kreiert eine fahrbare Trajektorie. Die Actuation ist die Schnittstelle zu den Fahrzeugaktuatoren. Sie stellt die Signale zum Folgen der Trajektorie, die einen zeitlichen Verlauf meist aus den Größen des Lenkwinkels, der Geschwindigkeit, der Gierrate und der Krümmung darstellt.

Die Module Perception und Planning beruhen meist auf den Daten einer High-Definition-Karte (HD-Karte). Innerhalb des Perception-Moduls ist diese ein wesentlicher Bestandteil für die Lokalisierung des Egofahrzeugs. Sie wird zur Kompensation der Schwächen der inertialen Messeinheit (IMU), der Odometrie, des globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) und der visuellen Lokalisierungsmethoden [21, S. 5] verwendet. Außerdem lassen sich damit Verkehrsschilder orten und interpretieren [21, S. 28]. Innerhalb der Planung wird die HD-Karte ebenfalls für mehrere Aspekte verwendet. Unter anderem kommt sie in der Verhaltensplanung zum Einsatz, um zum Beispiel bei mehreren Fahrstreifen zum erlaubten Zeitpunkt den Fahrstreifen zu wechseln [21, S. 112] oder allgemein den passenden Fahrstreifen zu wählen [35, S. 9]. Weiterhin findet sie in der Pfadplanung Verwendung, um beispielsweise während des Fahrstreifenfolgens Kenntnis über die Fahrstreifenmitte und die maximale Abweichung von der Fahrstreifenmitte zum Fahrbahnrand anhand der in der Karte gespeicherten Fahrbahnbreite [36, S. 916] zu haben. Darüber hinaus ist eine HD-Karte auch für die Routenplanung sinnvoll, weil dadurch Routen gewählt werden können, die die Fähigkeiten der Fahrzeugautomation und erwartete Manöver berücksichtigen [21, S. 101].

Grundsätzlich ist die Benutzung von Daten oder Algorithmen über die Vehicle-to-X Technologie möglich [37]. Dies stellt im Wesentlichen eine Verlagerung der Rechenkapazitäten vom Fahrzeug in ein Rechenzentrum dar oder eine Bereitstellung der Umgebungszustände wie Ampelschaltungen über die umgebende Infrastruktur oder andere Fahrzeuge (Vehicle-to-Vehicle), an Stelle von am Fahrzeug integrierten Sensoren. Die in Abbildung 2.2 dargestellte Architektur wird

dabei um die entsprechenden Module erweitert. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

2.1.2 Unzulänglichkeiten

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, die nach dem Stand der Technik und Wissenschaft aktuellen und wesentlichen Unzulänglichkeiten der Fahrzeugautomatisierung aufzuzeigen. Dazu werden die Auswertungen der Deaktivierungen der Automatisierung während des Betriebs (Disengagements) vorgestellt, um die Existenz von Unzulänglichkeiten ganz allgemein zu zeigen. Weiter wird anhand der im Folgenden vorgestellten Disengagement Reports die Entstehung der Unzulänglichkeiten diskutiert.

Das California Department of Motor Vehicles ist für die Führerscheinzulassungen und die Fahrzeuganmeldungen in Kalifornien zuständig [38]. Zudem regelt es, wie Unternehmen ihre autonomen Fahrzeugfunktionen auf kalifornischen Straßen testen dürfen. Teilnehmende Unternehmen verpflichten sich unter anderem, Disengagements und Unfälle zu berichten. Als Disengagement wird das Ausschalten des autonomen Modus bezeichnet, sofern ein Fehler der autonomen Technologie erkannt wird oder es für das sichere Betreiben des Fahrzeugs notwendig ist, dass der Sicherheitsfahrer den autonomen Modus löst und die Fahrzeugsteuerung unmittelbar übernimmt [39, S. 17-18]. Im Falle der Abwesenheit eines Fahrers wird unter Disengagement die Abschaltung der autonomen Technologie verstanden, wenn es die Sicherheit des Fahrzeugs, der Insassen des Fahrzeugs oder der Öffentlichkeit erfordert [39, S. 17-18]. Allein ein Auftreten eines Disengagements zeigt, dass die autonome Fahrfunktion Unzulänglichkeiten besitzt. Die Disengagement Reports bilden die Grundlage für einige Analysen zur Performance und Reife autonomer Fahrfunktionen.

In Summe sind in den Jahren von 2014 bis 2019 169.022 Disengagements berichtet worden [40]. Gemäß den Berichten der Jahre 2014 bis 2016 findet ein Disengagement ungefähr alle 338 km statt [41, S. 146]. Womöglich aufgrund einer etwas anderen Datenaufbereitung kommt Banerjee [42, S. 589] ungefähr auf ein Disengagement alle 422 km. Die Hersteller unterscheiden sich in der Häufigkeit der Disengagements. Darüber hinaus verändern sich die Daten jährlich. Während Waymo im Jahr 2016 auf ein Disengagement alle 9580 km kommt, sind es gemäß aktuelleren Disengagement Reports im Jahr 2019 ein Disengagement alle 21.275 km. Die Unzulänglichkeiten in der Automation wurden bei Waymo demzufolge weniger, sind aber weiterhin vorhanden.

Im Nachfolgenden werden tiefergehende Analysen der Disengagement Reports vorgestellt. Die Aussagekraft der Interpretationen auf Basis der Disengagement Reports sind jedoch vor allem aufgrund der uneinheitlichen und teilweise wenig aufschlussreichen Berichterstattung limitiert. So mussten Favaro et al. [41, S. 141] bei der Auswertung der Berichte von 2014 bis 2016 ungefähr 65 % der Disengagements aufgrund nicht sinnvoll interpretierbarer Einträge ausschließen. Sinha et al. [40] bereiteten im Jahr 2021 deswegen die nicht passend zur automatisierten Auswertung vorliegenden Disengagement Reports auf und stellen den Datensatz für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Einige Auswertungen haben jedoch zu dem Zeitpunkt schon auf uneinheitlichen Datenbasen stattgefunden.

Favaro et al. [41, S. 140-141] erstellen zur Kategorisierung der Disengagements die Makrokategorien Systemfehler, menschliche Faktoren, Externe Bedingungen und Andere. Die Auswertungen von Favaro [41, S. 142] zeigen, dass über alle auswertbaren Unternehmen hinweg im Durchschnitt 52 % der Disengagements der Kategorie Systemfehler zuzuordnen sind, auch

wenn die Verteilungen je Firma stark unterschiedlich sind. Davon sind die am stärksten vertretenen Fehlerarten Softwareabweichungen, Abweichungen in der Wahrnehmung und Probleme in der Verhaltensplanung.

Zhang [43, S. 8] organisiert seine Auswertung angelehnt an die Makro- und Mikrokategorien von Favaro [41]. Dementsprechend können deren beider Auswertungen, wie in Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 dargestellt, verglichen werden. Sie kommen auf unterschiedliche Anteile der Fehlerarten, deren geringe Diskrepanz auf die unterschiedlich aufbereitete Datenbasis, die Verwendung unterschiedlicher Algorithmen und die unterschiedlichen Datenzeiträume zurückzuführen ist. Favaro analysiert die Daten von 2014 bis 2017 [41, S. 137-138], Zhang von 2014 bis 2020 [43, S. 4]. Bei beiden fällt auf, dass die Wahrnehmung mit 12 % bzw. 18 % jeweils zu den drei größten Anteilen gehört.

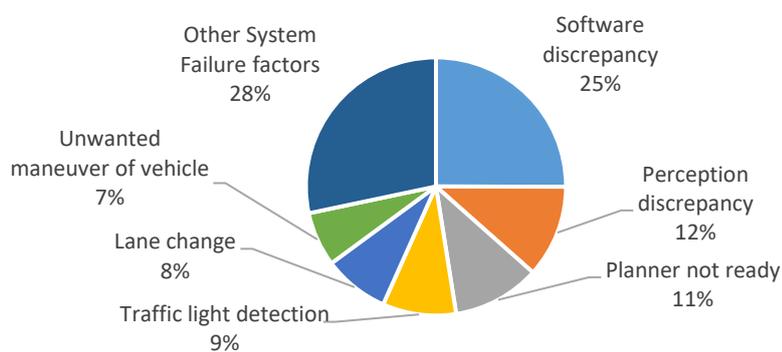


Abbildung 2.3: Auswertung der Disengagement Reports innerhalb der Makrokategorie Systemfehler nach Favaro [41, S. 142].

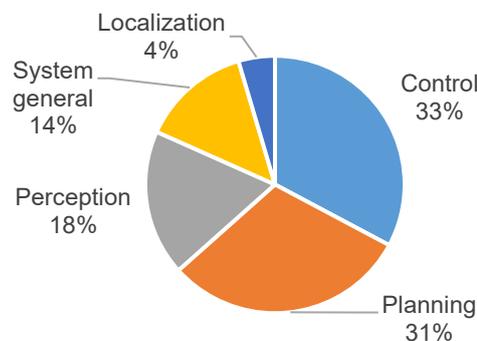


Abbildung 2.4: Auswertung der Disengagement Reports innerhalb der Kategorie System Failure nach Zhang [43].

Banerjee und Kollegen führen auf, dass einige Fehlentscheidungen der Verhaltensplanung auf Probleme in der Wahrnehmung zurückzuführen sind [42, S. 587]. Sie nutzen eine nach dem Vorgehen der STPA (System Theoretic Process Analysis) [44] erstellte Systemkontrollstruktur, anhand derer sie die Disengagements und Unfälle mittels deren Beschreibungen zu begründen versuchen [42, S. 589]. Sie kommen zu dem Schluss, dass ein großer Teil der Probleme in der Wahrnehmung liegt, dieser in die Systeme der Verhaltensplanung propagiert und dass schließlich komplexe Fehlerszenarien entstehen [42, S. 592]. Das heißt, dass einige Probleme möglicherweise der Verhaltensplanung zugeschrieben werden, obwohl deren Ursprung in der fehlerhaften Umgebungswahrnehmung liegt. Sie bemessen den Anteil der Disengagements aufgrund von Wahrnehmungsproblemen ungefähr auf 44 % [42, S. 591].

Boggs et al. [45, S. 5] werten die Disengagements unterteilt nach den Gründen Regelungsabweichungen, Umgebung oder Verkehrsteilnehmer, Hardware- und Softwareprobleme, Wahrnehmungsabweichungen und Planungsabweichungen aus. Auch bei ihnen ist die Kategorie Wahrnehmungsabweichungen der drittgrößte Anteil mit ungefähr 20,8 % [45, S. 7].

Zusammenfassend treten Disengagements auf und weisen dadurch auf die Existenz von Unzulänglichkeiten hin. Weiter ist ein großer Teil der Disengagements dem Bereich der Systemfehler, darunter insbesondere der Wahrnehmung und der Verhaltensplanung, zuzuordnen.

2.1.3 Wahrnehmung

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, die Herausforderungen der maschinellen Wahrnehmung zu erläutern und auf Falsch-Positive und ungewöhnliche Objekte einzugehen.

Es ist eine Herausforderung, die für den Straßenverkehr relevanten Objekte zu erkennen und zu lokalisieren. Das Erkennen und Lokalisieren der entsprechenden Objekte in einem 2D-Bild wird 2D-Objekterkennung genannt. Das Erkennen und Lokalisieren der entsprechenden Objekte auf der Datenbasis von 2D-Bildern und 3D-Punktwolken wird 3D-Objekterkennung genannt. Eines der bekanntesten Datensets zum Vergleich der Objekterkennungsalgorithmen ist die KITTI Vision Benchmark Suite [46]. Die Algorithmen werden darin bezüglich ihrer Average Precision [46, S. 5] verglichen. Ein Algorithmus kann nur eine hohe Average Precision erreichen, wenn er sowohl eine geringe Anzahl an Falsch-Positiven wie auch an Falsch-Negativen Detektionen aufweist [47, S. 313]. Dennoch erreichen selbst die besten Algorithmen keine 100 %. Die aktuell besten Algorithmen erreichen zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit in der mittleren Schwierigkeitsstufe bei Pkw 96,2 %, bei Fußgängern 80,8 % und bei Fahrradfahrern 82,8 % [48]. Zudem ist aufgrund der Vielfältigkeit der realen Umgebung die Performance der Objekterkennungsalgorithmen in der realen Welt geringer [49, S. 83].

Darüber hinaus ist die aktuell notwendige Beschränkung auf bestimmte Objektkategorien hinderlich. Beim KITTI-Datensatz werden aktuell nur die Kategorien Pkw, Fußgänger und Fahrradfahrer berücksichtigt. Der Datensatz BDD100K von Yu [50] ist als diverser Datensatz betitelt, weil er eine Vielzahl von Objektkategorien, Wetter- und Umgebungsbedingungen beinhaltet. Dennoch kommt er nur auf zehn verschiedene Objektkategorien. Es sind daher besonders in der breiten Anwendung Herausforderungen in der Wahrnehmung aufgrund der Objektvielfältigkeit in der realen Verkehrsumgebung zu erwarten.

2.2 Fernsteuerung von Straßenfahrzeugen

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Begriffe der Teleoperation und Teleassistenz definiert. Anschließend werden teleoperative Lösungsansätze nach der Steuerungsart kategorisiert und vorgestellt. Außerdem werden Annahmen und Erkenntnisse über die Latenzzeiten bei der Teleoperation erläutert und die Teleoperation im Kontext der Leitwarte einer automatisierten Fahrzeugflotte ausgeführt.

2.2.1 Definition der Teleoperation und der Teleassistenz

Im Rahmen der Fernsteuerung von Straßenfahrzeugen wird zwischen den Begriffen der Teleoperation und der Teleassistenz unterschieden. Diese werden nachfolgend erläutert. Abschließend wird geklärt, wie sich darin der Begriff des Monitorings einordnet.

„Ein Teleoperationssystem ist ein System, in dem ein in der Regel ferngesteuerter Slave-Roboter in der realen Umgebung Aufgaben ausführt, die der menschliche Operator über die haptische Schnittstelle vorgibt“ [51, S. 36] (wörtliche Übersetzung). Der menschliche Operator ist der Bediener des Systems und wird im Folgenden als Operator bezeichnet. Dementsprechend wird der Arbeitsplatz als Operatorarbeitsplatz bezeichnet. Er beinhaltet alle Schnittstellen, über die der Operator den Roboter steuert. Das können ein Joystick, Lenkrad und Pedale, Stift, Touchelemente oder eine Sprachbedienung sein. Der Operator wird in der SAE-Norm als „remote driver“ bezeichnet [3, S. 21].

Der ferngesteuerte Slave-Roboter ist im Kontext der Straßenfahrzeuge das ferngesteuerte Straßenfahrzeug. Nach Hirche [52, S. 3430] wird der ferngesteuerte Roboter „Teleoperator“ genannt, wohingegen nach Lockwood [53, S. 6] der menschliche Bediener „Teleoperator“ genannt wird. Aufgrund der unglücklichen, widersprüchlichen Bezeichnungen wird in dieser Arbeit auf den Begriff Teleoperator verzichtet. In dieser Arbeit wird der menschliche Bediener als Operator bezeichnet und der ferngesteuerte Roboter als Fahrzeug.

In dem nachfolgenden Abschnitt werden unter anderem Steuerungsarten vorgestellt, bei denen die automatisierte Fahrfunktion die Fahrzeugstabilisierung, die Fahrzeugführung oder die Hauptverantwortung über die Fahrzeugführung übernimmt. Weil die interagierende Person dabei eine assistierende Rolle einnimmt, ist für diese Steuerungsarten der Begriff der Teleassistenz passend. Dementsprechend wird die assistierende Person als Teleassistent bezeichnet. Auch die SAE-Norm J3016 [3, S. 22] beschreibt den „remote assistant“ als eine Person, die dem AF ereignisinitiiert in unklaren Situationen Informationen oder Anweisungen gibt, um eine Weiterfahrt zu ermöglichen. Der Teleassistent grenzt sich somit vom Operator ab, indem er nicht auf der Stabilisierungsebene agiert oder nicht auf echtzeitkritische Ereignisse reagieren muss. Diese Trennung ist jedoch zum Teil unscharf, weil Steuerungsarten existieren, bei denen Anweisungen gegeben werden und diese allerdings in Echtzeit beobachtet werden müssen und entsprechend darauf reagiert werden muss. Waymo bezeichnet diese Art ebenfalls als „remote assistance“ [54, S. 5]. Zoox bezeichnet es als „teleoperator guidance“ [55, S. 29] oder „TeleGuidance“ [8].

Das Monitoring meint nach der SAE-Norm das aufmerksame Wahrnehmen, die Verarbeitung und das Verstehen des Beobachteten [3, S. 16]. Dem eingeschlossen ist das Vorbereiten passender Reaktionen. Explizit ausgeschlossen ist die Ausführung der Reaktionen. Das Monitoring kann somit eine eigenständige Tätigkeit neben der Teleassistenz oder der Teleoperation sein, sie ist allerdings auch immer zwingend ein Teil der Teleoperation.

2.2.2 Steuerungsarten

In der Anwendung können die Teleoperation und die Teleassistenz verschiedene Ausprägungen annehmen. Diese Ausprägungen werden Steuerungsarten genannt. Ziel dieses Abschnittes ist die Klärung der Bezeichnungen der Steuerungsarten und deren Vorstellung.

In Abbildung 2.5 sind schematisch mögliche Eingriffsebenen der Teleoperation und der Teleassistenz in die Automation veranschaulicht. Diese orientieren sich an der Sense-Plan-Act-Architektur aus Abbildung 2.2. Entsprechend den Eingriffsebenen wird im Folgenden eine Übersicht

über die Arten der Teleoperation und der Teleassistenz ausgeführt, deren Anwendung zum Ziel hat, Unzulänglichkeiten der Automation zu überwinden.

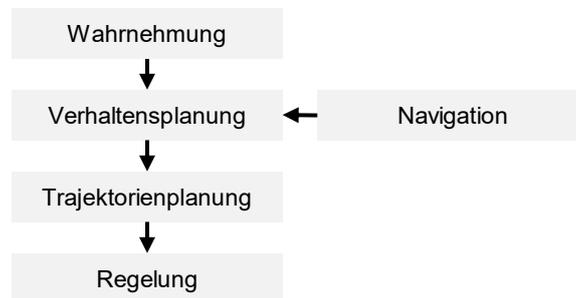


Abbildung 2.5: Eingriffsebenen der Teleoperation

Die nachfolgende Ausführung stützt sich auf Veröffentlichungen und Patente. Ein Großteil der Ansätze der Interaktion zwischen Operator und Fahrzeug werden in Patenten von Zoox genannt [53, 55]. Diese agieren entsprechend der Abbildung 2.5 auf den Ebenen oberhalb der Trajektorienplanung.

Navigation

In der Ebene der Navigation gibt der Operator dem Fahrzeug eine Mission vor oder ändert diese [56, S. 3] [57, S. 11351] [55, S. 7]. Dadurch kann dem Fahrzeug zum Beispiel im Fall einer gesperrten Straße die Weiterfahrt ermöglicht werden, ohne als Operator tiefer in die Automation eingreifen zu müssen. Routenänderungen können auch indirekt und automatisiert für das jeweilige Fahrzeug getriggert werden, dessen Route durch ein Straßensegment führt, das durch den Operator als nicht befahrbar markiert wurde [53, S. 29].

Wahrnehmung

Auf der Wahrnehmungsebene kann der Operator die Fahrzeugautomation auf unterschiedliche Arten unterstützen. Einige dieser Teleassistenzarten werden im Folgenden vorgestellt.

Eine Unterstützung durch den Operator kann sein, eine Erkennung innerhalb des Fahrkorridors zu ignorieren. Diese Art der Modifizierung ist wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen dieser Arbeit. Sie wird im Folgenden Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung (MMW) genannt. Die Idee dieser Modifizierung wird bereits in anderen Veröffentlichungen genannt. Kettwich [58, S. 7] untersucht ihr Visualisierungskonzept für die Teleoperation unter anderem anhand des Auftretens einer Detektion, die von der Fahrzeugsoftware nicht sicher eingeordnet werden kann. Der Operator sichtet die Situation und gibt die Fahrt frei, nachdem er sichergestellt hat, dass es sich nicht um ein Hindernis handelt, sondern lediglich um eine Fehlauflösung der maschinellen Wahrnehmung. Weiter wird in dem Patent von Zoox [53, S. 40] die Möglichkeit aufgeführt, fälschlich als hinderlich detektierte Objekte für die nachfolgende Planung zu vernachlässigen. Als Beispiele für solche Objekte werden Müll oder kleine Äste aufgelistet [53, S. 43].

Weiter kann ein Operator die Automation unterstützen, indem er den Bereich, der für die Planung berücksichtigt wird und meist über Kartenmaterial hinterlegt ist, kurzzeitig erweitert. In einem

Patent von Zoox [53, S. 39] hat der Operator die Möglichkeit, den fahrbaren Bereich über unterschiedliche Eingabegeräte auf Bereiche zu erweitern, die für die Planung vorher nicht in Erwägung gezogen wurden. Diese Bereiche können Fahrstreifen des Gegenverkehrs oder Fußgängerwege sein. Dadurch können Baustellen innerhalb des eigenen Fahrstreifens über den erweiterten Bereich umfahren werden. Schitz [59] schlägt ein weiteres Teleoperationskonzept zur Veränderung des für die Planung nutzbaren Bereichs vor. Der Operator gibt dabei durch die Vorgabe von Zielpunkten in der Grid-Map oder in der Top-View Ansicht indirekt über eine voreingestellte Korridorbreite und eine Splinefunktion einen Bereich vor. Innerhalb dieses Bereichs plant das Fahrzeug selbstständig unter Berücksichtigung der detektierten Hindernisse die Trajektorie und führt diese aus. Mit diesem Konzept adressiert Schitz ebenfalls Fälle, in denen situativ andere befahrbare Bereiche als in der HD-Karte vorgegeben zur Situationslösung benötigt werden oder die automatisierte Wahrnehmung nicht in der Lage ist, befahrbare Bereiche zu bestimmen (Baustelle, fehlende Fahrbahnmarkierungen). Schitz setzt dieses Konzept um. Eine Evaluation mittels einer Probandenstudie findet nicht statt. Positive Auswirkungen dieses Systems bezüglich der mentalen Beanspruchung und Bearbeitungszeit werden vermutet, wurden aber noch nicht erhoben. Die Demonstration der Funktionsfähigkeit fand simulativ und real statt [59, S. 177]. Dieses Konzept findet sich in sehr ähnlicher Weise in den Patenten von Caldwell [60] [61], die ebenfalls in Besitz von Zoox sind. Das Konzept der Bereichsänderung wird in einem Patent von Gogna (Zoox) [62] erweitert, so dass der Operator den Pfad nicht über das Klicken von Wegpunkten eingibt, sondern durch das Steuern eines virtuellen Fahrzeugs entlang des gewünschten Pfads. Als Eingabegerät werden dafür dementsprechend Lenkrad, Pedale oder Gaming-Controller aufgeführt.

Eine weitere Möglichkeit der Unterstützung durch den Operator im Bereich der Wahrnehmung ist die Korrektur einer unpassenden, dynamischen Bewegungsprädiktion. In einem Patent von Zoox [53, S. 40] wird eine Problemsituation beschrieben, in der eine unpassende Bewegungsprädiktion eines Fußgängers, der am Fahrbahnrand Reifen wechselt, die Weiterfahrt des Egofahrzeugs verhindert. Für den Fußgänger werden von der maschinellen Wahrnehmung Trajektorien in den Fahrkorridor des Fahrzeugs als möglich prädiziert. In dieser Situation ist dies jedoch äußerst unwahrscheinlich. Über die Vorgabe eines Bereichs, den das Fahrzeug nicht befahren soll, ersetzt der Operator die in diesem Bereich als dynamisch interpretierten Objekte durch einen statischen Bereich. Das Fahrzeug ignoriert im weiteren Verlauf die Bewegungsprädiktion der im statischen Bereich befindlichen Objekte. Zusätzlich erlaubt der Operator das Befahren des benachbarten Fahrbahnstreifens über eine Bereichserweiterung, um damit eine Umfahrung des Hindernisses zu ermöglichen.

Verhaltensplanung

In der Verhaltensplanungsebene kann der Operator das Fahrzeug unterstützen, indem er das Verhalten oder die Manöver des Fahrzeugs beeinflusst, erstellt oder auswählt.

In dem Patent von Zoox [53, S. 27] kann der Operator durch den örtlich begrenzten Wechsel des Betriebsmodus das Verhalten des Fahrzeugs verändern. Die Betriebsmodi werden über Leistungsparameter, Betriebsrichtlinien, -gesetze und -regularien spezifiziert [53, S. 28]. Leistungsparameter sind beispielsweise Brems- oder Lenkwerte [53, S. 41]. Entsprechend der vorliegenden Situation kann der Operator über einen Wechsel der Betriebsmodi diese Spezifikation ändern und die Verhaltensweise des Fahrzeugs modifizieren. Darüber hinaus lässt sich Gogna (Zoox) [63, S. 28] ein Konzept patentieren, in dem der Operator kurzzeitig manche der Regeln außer Kraft setzen kann, die der Automation vorgeschrieben sind. In dem Patent werden

die folgenden, veränderlichen Regeln genannt: (1) einem anderen Fahrzeug an einer Kreuzung Vorfahrt gewähren. (2) während des Fahrstreifenfolgens nicht den eigenen Fahrstreifen verlassen. Damit adressiert Gogna Situationen, in denen das Egofahrzeug durch eine strikte Beachtung der programmierten Regeln stehen bleibt und den Verkehrsfluss hindert. Zum einen sind das Kreuzungssituationen, in denen das Vorfahrt habende Fahrzeug auf seine Vorfahrt verzichtet, weil dessen Route vom nicht Vorfahrt habenden Fahrzeug blockiert ist. Zum anderen sind es Situationen, in denen das Egofahrzeug durch ein parkendes Fahrzeug die Fahrt nicht in seinem Fahrstreifen fortsetzen kann. Durch das kurzzeitige Ausweichen auf einen anderen Fahrstreifen ist die Situation lösbar.

Weiter kann der Operator auf der Ebene der Verhaltensplanung eine Manöverauswahl treffen. Fairfield (Waymo) [54, S. 15] lässt sich ein System patentieren, bei dem der Operator dem Fahrzeug die Freigabe für die vom Fahrzeug vorgeschlagenen Handlungen erteilt. Als Beispiel wird ein Linksabbiegemanöver an einer grünen Ampel mit Gegenverkehr genannt, bei dem der Operator die Wahlmöglichkeit zwischen „Fortfahren“ und „Nicht Fortfahren“ hat. Durch die Wahl von Fortfahren bestätigt der Operator, dass aktuell kein Gegenverkehr kommt und das automatisierte Fahrzeug selbständig links abbiegen darf. Der Operator trägt für den Sachverhalt die Verantwortung, dass sich kein zu einer kritischen Situation führender Gegenverkehr nähert. Mit dieser Steuerungsart werden im Allgemeinen Linksabbiegemanöver adressiert, für dessen Evaluation die Automation nicht die nötige Sichtweite oder allgemein nicht die nötigen Fähigkeiten besitzt. Szpotowicz [64, S. 53] schlägt ein System vor, bei dem der Operator die Art des Manövers vorgibt und die kollisionsfreie Planung beim Fahrzeug liegt. Die technische Realisierbarkeit wurde über eine Umsetzung in der Simulation gezeigt.

Trajektorienplanung

In der Trajektorienplanungsebene kann der Operator die Trajektorienplanung unterstützen.

Beispielsweise steuert Gnatzig das Fahrzeug über Trajektoriensegmente [65, S. 58]. Die Wahrnehmung, Navigation, Verhaltensplanung und Trajektorienplanung liegen beim Operator. Die Stabilisierungsebene bestehend aus der Ausführung und der Regelung übernimmt das Fahrzeug. Unter den zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Gesamtlatenzzeiten von ca. 600 ms [65, S. 12] ist das ein passender Ansatz, um die Regelkreisinstabilitäten zu verhindern.

Biehler [66] lässt sich darüber hinaus neben der direkten Steuerung (DS) ein System patentieren, bei welchem der Operator auf einem Touchscreen mittels Stift einen korrigierten Soll-Weg vorgeben kann. Das Fahrzeug folgt diesem Soll-Weg. Hierbei kann der Operator das Fahrzeug überwachen und steuern [66, S. 5].

Das starre Prozedere über die Vorgabe, Bestätigung und Ausführung lassen diese Konzepte nicht praktikabel für eine innerstädtische Anwendung erscheinen. In den sich laufend ändernden Umgebungen mit vielen Verkehrsteilnehmern sind häufige Neuplanungen für eine Situation durch den Operator zu erwarten. Die aufgeführten Konzepte adressieren im Wesentlichen Systeme, die aufgrund einer hohen Latenz eine Entkopplung des Operators von der Ausführungsebene verlangen und diese aufgrund einer relativ statischen Umgebung ermöglichen.

Ausführung und Regelung

Auf der Ebene der Ausführung und Regelung kann der Operator das Fahrzeug direkt über Vorgabe eines Lenkradwinkels und einer Geschwindigkeit oder eines Beschleunigungswunsches

steuern [67] [68]. Diese Art der Steuerung wird im Nachfolgenden DS genannt. Es ahmt den konventionellen Fahrer eines Fahrzeugs nach, agiert auf der Stabilisierungsebene und bringt deswegen Herausforderungen bezüglich der Kollisionsfreiheit mit sich. Zum einen stellt die Latenzzeit eine Ursache dafür dar. Diese macht im Allgemeinen die Aufgabenausführung schwieriger [69, 192ff], insbesondere die Fahrzeugstabilisierung [70] [71]. Zum anderen trägt auch die erschwerte Umgebungswahrnehmung über komprimierte und teilweise verzerrte Kamerabilder dazu bei.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden Assistenzsysteme für die Teleoperation vorgeschlagen. Diese unterstützen den Operator im Wesentlichen visuell oder haptisch (force feedback). Sofern Shared Control Ansätze den Fahrer nicht überstimmen, werden sie zu diesem Bereich gezählt. Im Folgenden werden die haptischen und visuellen Assistenzsysteme vorgestellt.

Hosseini [72] schlägt eine interaktive Pfadplanung vor, die, wenn im Rahmen der DS eingesetzt, dem Operator über ein haptisches Feedback Rückmeldung über kollisionsfreie Pfade geben kann. Evaluiert ist die technische Umsetzbarkeit anhand von realen Aufnahmen. Weitere Vorschläge zu Assistenzsystemen für die DS führt Hosseini in [73] aus. Aufgrund der niedrigen Anzahl an Versuchspersonen bei den Studien können nach Einschätzung des Autors die Verbesserungen aufgrund der Entwicklungen vermutet, aber nicht als bestätigt angenommen werden.

Schimpe [74] schlägt ein Model-Predictive-Control-basiertes Assistenzsystem vor, das auf Basis der im Fahrzeug vorhandenen Sensorik bevorstehende Kollisionen mittels einer Lenkwinkelkorrektur vermeidet. Die Funktionalität wird in der Simulation gezeigt. Eine Untersuchung mittels einer Probandenstudie hat noch nicht stattgefunden. Haptische und visuelle Rückmeldungen an den Operator sind vorgesehen, wurden aber noch nicht umgesetzt.

Visuelles Feedback wird über unterschiedliche Assistenzsysteme vorgeschlagen. Graf [75] verändert die Berechnung des von Chucholowski [76] entwickelten Predictive Displays und kombiniert anschließend die vorausschauende Anzeige mit dem von Tang entwickelten „Freien Korridor“ zu einem Predictive Corridor [77], wie es von Tang [78, S. 112] vorgeschlagen wird. Dem Operator wird dadurch seine latenzkompensierte Position und der sich anschließende Notbremsweg angezeigt.

2.2.3 Latenzzeiten der Teleoperation

Bei der Teleoperation ist die Gesamtlatenzzeit von Relevanz, weil diese vom Operator besonders in der Anwendung der DS zu kompensieren ist. Die Gesamtlatenzzeit schließt neben der Latenzzeit durch das Netzwerk die Latenzzeiten der Sensorik, Aktorik und der restlichen Soft- und Hardware ein. Sie kann unterteilt werden in eine Videolatenzzeit und eine Steuerungslatenzzeit. Die Gesamtlatenzzeit ist dementsprechend stark systemabhängig. Georg [79, S. 6] analysiert die Latenzzeiten des zu diesem Zeitpunkt (2020) vorliegenden Systems des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München im Detail und erhält eine minimale Gesamtlatenzzeit im Stand und über das LTE-Mobilfunknetz (4G) von 190,35 ms. Das Mobilfunknetzwerk trägt im Durchschnitt einen Anteil von 57 ms dazu bei [79, S. 6] (errechnet aus dem Unterschied zwischen den Mittelwerten des LAN- und des LTE-Setups). Auf ähnliche Durchschnittswerte für die Mobilfunkverbindung kommt Neumeier [80, S. 3] mit durchschnittlich 55 ms Latenzzeit für den Ping. Die restlichen, wesentlichen Latenzzeiten entstehen in der Massenträgheit des Lenksystems, der Sensoren (Kamera) und der Wiedergabegeräte (Monitore,

Head-Mounted-Displays). Die Gesamtlatenzzeit hat sich im Vergleich zu den 2015 angenommenen Latenzzeiten von über 600 ms deutlich reduziert [65, S. 78].

2.2.4 Teleoperation im Kontext der Leitwarte

Das Ziel des Abschnittes ist die Vorstellung des betrieblichen Ablaufs der Teleoperation in einer zukünftigen Leitwarte einer automatisierten Fahrzeugflotte. Dazu werden im Folgenden die wesentlichen wissenschaftlichen Erkenntnisse, der Transfer aus bestehenden Leitwarten anderer Anwendungen, die gesetzlichen Vorgaben und die Konsequenzen für die Ausprägung der Teleoperation aufgeführt.

Der Begriff Teleoperation, wie er in Abschnitt 2.2.1 definiert ist, bezeichnet eine Technologie. Diese Technologie kann in verschiedenen Gebieten zur Anwendung kommen. Im Kontext einer automatisierten Fahrzeugflotte unterstützt die Teleoperation situativ, sobald ein automatisiertes Fahrzeug nicht selbstständig seine Mission erfüllen kann. Die Teleoperation ist dabei eine von vielen Möglichkeiten zur Problembewältigung. Fachpersonal vor Ort oder im Fahrzeug könnte auf Abruf ebenfalls unterstützen.

Die Leitwarte, auch Kontrollzentrum genannt, ist für den Betrieb einer automatisierten Fahrzeugflotte verantwortlich und kann die Aufgaben der Technischen Aufsicht erfüllen. Die Technische Aufsicht ist laut dem deutschen Gesetz zum autonomen Fahren eine Person, die vier Aufgaben zu erfüllen hat. Erstens muss sie Fahrmanöver, die das AF vorschlägt, sobald es eine Situation nicht selbstständig lösen kann, bewerten und falls geeignet freigeben [81, S. 2]. Die Fahrmanöver muss das AF nach der Freigabe selbstständig abfahren [81, S. 2]. Zweitens muss die technische Aufsicht die autonome Fahrfunktion bei einer entsprechenden Meldung unverzüglich deaktivieren [81, S. 3]. Drittens muss sie „Signale der technischen Ausrüstung zum eigenen Funktionsstatus“ [81, S. 3] bewerten und entsprechend notwendige Maßnahmen einleiten. Viertens muss sie Kontakt zu den Insassen aufnehmen und verkehrssichernde Maßnahmen einleiten, wenn sich das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand überführt [81, S. 3]. Das Gesetz äußert sich nicht zur direkten Fernsteuerung des Fahrzeugs in Echtzeit. Unklar ist aufgrund der fehlenden Definition des Begriffs Fahrmanöver und aufgrund der Genehmigung für die Vorgabe von Fahrmanövern im Ausnahmefall [81, S. 2], ob das Gesetz zum autonomen Fahren eine trajektorienbasierte Teleoperation inkludiert, wie sie von Hoffmann [82] vorgeschlagen wird. Unklar in der aktuellen Ausführung des Gesetzes ist zudem, ob eine Technische Aufsicht für mehrere Fahrzeuge zuständig sein darf. Zusammengefasst muss die Technische Aufsicht die automatisierte Fahrfunktion beobachten, eventuell deaktivieren, zur Situationslösung beitragen und den Informationsaustausch zu den Passagieren durchführen. Die Teleoperation und die Teleassistenz sind folglich als Teil der Technischen Aufsicht in der Leitwarte gesetzlich verankert.

Im Folgenden wird zwischen Leitwartenpersonal und Operatoren unterschieden sowie entsprechend zwischen Leitwartenarbeitsplatz und Operatorarbeitsplatz. Eine scharfe Trennung der jeweiligen Begriffe gibt es nach dem Wissen des Autors zum jetzigen Zeitpunkt nicht. Der Übergang dieser Begriffe wird als fließend verstanden, siehe Abbildung 2.6. Das Leitwartenpersonal agiert auf höheren Abstraktionsebenen (Navigation, Fahrzeugführung), kann aber auch Teilfunktionen der Teleoperation ausführen. Ein Operator hat den größtmöglichen Handlungsspielraum zur Fernsteuerung des Fahrzeugs, kann aber je nach Ausprägung Teilfunktionen des Leitwartenpersonals übernehmen. Neben den Eingriffsmöglichkeiten kann sich deren Häufigkeit unterscheiden. In Abbildung 2.6 ist die Trennung der Begriffe qualitativ veranschaulicht.

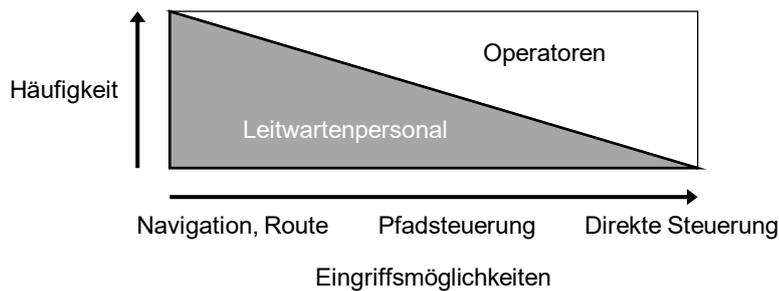


Abbildung 2.6: Veranschaulichung der unterschiedlichen Bezeichnungen Leitwartenpersonal und Operator anhand der Häufigkeit und der Möglichkeiten der Tätigkeit

Die Anwendungsfälle der Teleoperation legen bestimmte Randbedingungen fest. Diese sind unter anderem die Art des betriebenen Fahrzeugs, dessen Umgebung inklusive Verkehrsteilnehmer, die Netzwerkbedingungen und daraus resultierende Szenarioparameter. Zur Einteilung dieser Szenarien schlägt Kettwich ein Kategorisierungsschema mit den Kategorien Fahrzeug, Teleoperationsarbeitsplatz, Interaktionspartner und Umgebung sowie den jeweiligen Untergruppen vor [83, S. 92].

Darüber hinaus bedingen die Anwendungsfälle der Teleoperation den betrieblichen Kontext. Analog zu den Leitwarten des öffentlichen Nahverkehrs basierend auf Bus und Bahn wird das Leitwartenpersonal möglicherweise mit zunehmender Reife der automatisierten Fahrfunktion für mehrere Fahrzeuge zuständig sein [53, S. 28]. Deswegen, und um Kosten für die Datenübertragung zu sparen [84, S. 70], werden nicht dauerhaft alle verfügbaren Daten vom AF in die Leitwarte gestreamt werden, sondern ein häufiges Verbinden mit und Trennen von einem AF stattfinden. Zum einen wird das Leitwartenpersonal die Fahrzeugflotte fahrzeugübergreifend beobachten. Dazu wird es den Grad der Missionserfüllung, Akku- oder Tankfüllstände und weitere Betriebsparameter bezüglich Auffälligkeiten beobachten [56, S. 4]. Zum anderen wird im Falle von Auffälligkeiten oder zur näheren Betrachtung eine 1:1 Verbindung mit dem Fahrzeug stattfinden [53, S. 27, 85, S. 71]. Der Bedarf dazu kann durch das Fahrzeug gemeldet werden oder durch das Leitwartenpersonal festgestellt werden. Das Leitwartenpersonal kann sich, wenn notwendig, die entsprechenden Videostreams zur Entstehung der Situation wiedergeben lassen [53, S. 29]. Das häufige Verbinden mit neuen Fahrzeugen erfordert sowohl vom Leitwartenpersonal als auch von den Operatoren, sich regelmäßig mit neuen Situationen vertraut zu machen und das Situationsverständnis neu zu generieren [86, S. 11].

Zusammenfassend wird die Teleoperation mittels eines Simulatorarbeitsplatzes vom regelmäßigen Trennen von und Verbinden mit eventuell unterschiedlichen Fahrzeugen geprägt sein. Die Operatoren können für mehrere Fahrzeuge zuständig sein. Sie werden sich nach einer Aufforderung mit einem Fahrzeug verbinden, die Situation sichten, die Situation, wenn möglich, lösen und sich wieder vom Fahrzeug trennen.

2.3 Menschliche Informationsverarbeitungsmodelle

In diesem Abschnitt werden Modelle zur menschlichen Informationsverarbeitung unter dem Aspekt der Beanspruchung vorgestellt.

2.3.1 Definition der Beanspruchung

Die DIN EN ISO 10075-1 [87] normiert im Bereich der Ergonomie die Begriffe und Konzepte der psychischen Belastung und Beanspruchung. Diese Definition wird in dieser Arbeit verwendet. Psychisch wird daher in Bezug auf alle Vorgänge menschlichen Erlebens und Verhaltens verstanden und schließt kognitive wie emotionale Prozesse ein [87, S. 10]. Es findet demnach keine Unterscheidung zwischen kognitiver und emotionaler Beanspruchung statt, weil diese Gegebenheiten miteinander in Beziehung stehen und daher nicht getrennt voneinander analysiert werden können [87, S. 10]

Die psychische Belastung wird als die „Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse definiert, die von außen auf einen Menschen zukommen und diesen psychisch beeinflussen“ [87, S. 6]. Sie ist damit eine objektive Größe. Die psychische Beanspruchung hingegen wird als „unmittelbare Auswirkung der *psychischen Belastung* [...] im Individuum in Abhängigkeit von seinem aktuellen Zustand“ [87, S. 7] verstanden. Dies bedeutet, dass die Beanspruchung das subjektive Empfinden der jeweiligen Person bezeichnet. Folglich kann dieselbe psychische Belastung bei unterschiedlichen Personen eine unterschiedliche psychische Beanspruchung hervorrufen. Individuelle Eigenschaften sind zum Beispiel die Motivation, Fähigkeiten oder der Allgemeinzustand. Der Begriff mental wird in dieser Arbeit als Synonym für psychisch verstanden.

Auf dem Gebiet der Arbeitswissenschaften wird zwischen den beiden Extremen der Hand- und Kopfarbeit bzw. energetisch-effektorischen und informatorisch-mental Arbeit unterschieden [88, S. 142]. Die energetisch-effektorische Arbeit spielt in dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle, weil sie lediglich das reine Ausführen von Bedientätigkeiten umfasst. Deswegen wird im Folgenden auf die informatorisch-mentale Arbeit eingegangen. Für die Einteilung der informatorisch-mental Arbeit kann der klassischen psychophysiologischen Gliederung in die drei Phasen der Informationsaufnahme, der Informationsverarbeitung und der Reaktion durch motorische Regulation und Informationsabgabe [88, S. 143] gefolgt werden.

Das Ausrichten von Arbeitsformen nach der gesicherten Erkenntnis über die Funktionsweise menschlicher Informationsverarbeitung steigert die Wahrscheinlichkeit, menschliche Ressourcen sinnvoll zu nutzen [88, S. 186]. Die unterschiedlichen Modelle der Informationsverarbeitung bieten neben den daraus ableitbaren Gestaltungsempfehlungen einen Zugang, um die informatorisch-mentale Arbeit hinsichtlich mentaler Belastung und Beanspruchung messtheoretisch zu bewerten [88, S. 187].

Nach Schlick [88, S. 5] wird zwischen zwei Modellierungsarten der menschlichen Informationsverarbeitung unterschieden: Phänomenologisch-empirische Modelle, die versuchen, das Wesen der Sachverhalte und deren Elemente mittels einer geistig-intuitiven Anschauung zu beschreiben [88, S. 187], und mathematisch-funktionale Modelle, die mentale Prozesse über Gleichungssysteme darzustellen versuchen [88, S. 195]. Es wird nur auf Erstere eingegangen, weil mathematisch-funktionale Modelle in dieser Arbeit keine Anwendung finden.

2.3.2 Sequentielle Modelle

Die Sequentiellen Modelle werden auch Stufenmodelle genannt [88, S. 187]. Ihnen liegt die Annahme zugrunde, dass bestimmte Verarbeitungsstufen sequentiell durchlaufen werden müssen. Diese benötigen Zeit. Eine Leistungsvariabilität tritt aufgrund der unterschiedlichen Art und Anzahl der Stufen je Aufgabe auf [88, S. 187].

Zu den sequentiellen Modellen zählen die Regulationsebenenmodelle. Sie sind Informationsverarbeitungsmodelle, deren Informationsverarbeitungsvorgänge auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen (Regulationsebenen) geschehen. Zwischen den Abstraktionsebenen ist eine simultane Verarbeitung möglich, innerhalb einer Ebene laufen die Vorgänge aber sequenziell ab. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist das Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen [88, S. 188]. Es beinhaltet die drei Regulationsebenen des wissensbasierten, regelbasierten und fertigkeitsbasierten Verhaltens. Mit entsprechender Übung können nach Schlick [88, S. 189] bestimmte Aufgaben von wissens- zu regelungsbasiertem Verhalten und von regelungs- zu fertigkeitsbasiertem Verhalten übergehen.

2.3.3 Kapazitätsmodelle

Kapazitätsmodelle zeichnet im Allgemeinen aus, dass eine kognitive Kapazität den Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses zugewiesen wird, was mit einem Energieeinsatz vergleichbar ist und dadurch das Aufkommen mentaler Beanspruchung modelliert [88, S. 189]. Ein bekanntes Kapazitätsmodell ist das Aufmerksamkeitstheoretische Modell, das im Folgenden vorgestellt wird.

Aufmerksamkeitstheoretische Modelle

Aufmerksamkeitstheoretische Konzepte wurden entwickelt, um Interferenzeffekte bei Doppeltätigkeiten zu erklären [88, S. 192]. Es wird „von einer momentan begrenzten, zeitlich variablen und unspezifischen Ressource des Informationsverarbeitungssystems ausgegangen, die als Verarbeitungskapazität interpretiert wird.“ [88, S. 192] Mentale Beanspruchung meint in diesem Zusammenhang die Ressourcenauslastung durch den Informationsverarbeitungsprozess [88, S. 192].

In dem nach Wickens und Hollands [88, S. 192] dargestellten Informationsverarbeitungsmodell in Abbildung 2.7 sind auch das Arbeits- und Langzeitgedächtnis integriert, weil sie bei der Mustererkennung und Entscheidungsfindung einen Anteil haben müssen. Beim Zurückgreifen auf dieselbe Kapazität durch unterschiedliche Prozesse sagt Kahnemann einen Leistungsabfall vorher (allocation policy) [88, S. 192]. Norman und Bobrow unterscheiden grundsätzlich kontrollierte und automatische Prozesse [88, S. 192]. Kontrollierte Prozesse benötigen geistige Ressourcen und werden daher auch ressourcenlimitierte Prozesse genannt, wohingegen die Ausführungsgüte von automatischen Prozessen lediglich von der Qualität der zur Verfügung stehenden Reize abhängt. Automatische Prozesse können also unabhängig von kontrollierten Prozessen zur immer gleichen Qualität ausgeführt werden. Dadurch ist eine Erklärung von Leistungsunterschieden bei Mehrfachaufgaben möglich, die auch grafisch über eine Performance Operating Characteristic darstellbar ist [88, S. 193].

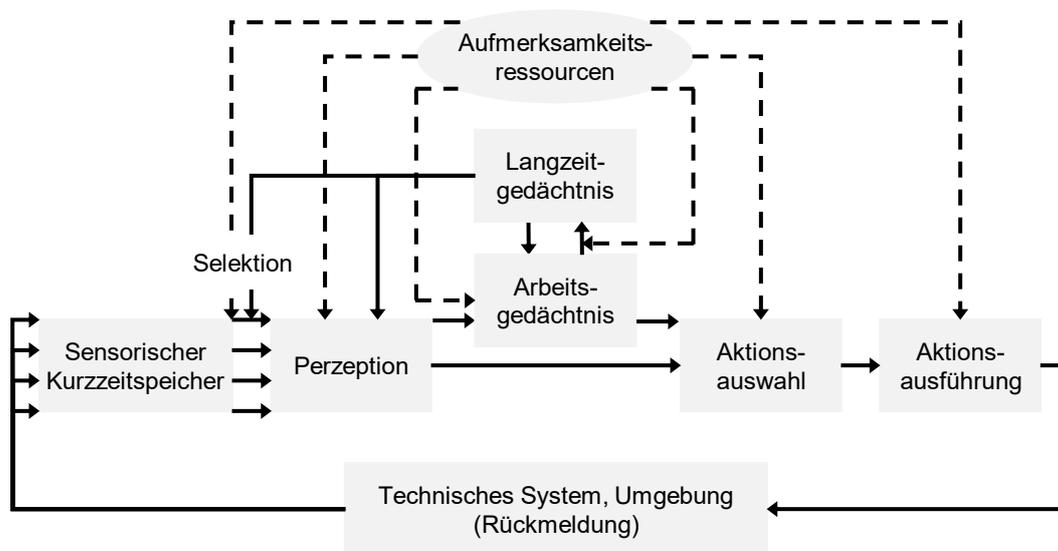


Abbildung 2.7: Informationsverarbeitungsprozess und Aufmerksamkeitsressourcen nach Wickens und Hollands [89, S. 4].

Aus diesem Modell lassen sich jedoch noch nicht Leistungsunterschiede bei Mehrfachaufgaben in Abhängigkeit der Unterschiedlichkeit der Mehrfachaufgaben erklären, weil das dem Prinzip der einen, zentralen, gemeinsam genutzten Ressource nach Manzley widerspricht [88, S. 194]. Dafür wurden die multiplen Ressourcenmodelle entwickelt.

Multiple Ressourcenmodelle

„Die Theorie der multiplen Ressourcen nach WICKENS (1992) geht davon aus, dass es statt nur einer zentralen Quelle von Ressourcen mit Satellitenstruktur mehrere Kapazitäten mit ressourcenartigen Eigenschaften gibt.“ [88, S. 194] Die Kernaussage ist, dass Mehrfachaufgaben, die sich unterschiedlicher Ressourcen bedienen, mit einer höheren Leistung ausgeführt werden können als Mehrfachaufgaben, für deren Bearbeitung im Informationsverarbeitungsprozess auf dieselben Ressourcen zurückgegriffen werden muss. Nach Wickens teilen sich die Ressourcen entlang von vier Dimensionen auf [90, S. 163], dargestellt in Abbildung 2.8. Jede dieser Dimensionen ist dichotom, also in zwei Ausprägungen aufgeteilt [90, S. 163]. Die erste Dimension sind die Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses mit den Ausprägungen der perzeptiven und kognitiven Aktivitäten gegenüber der Auswahl und Ausführung der Reaktion. Die zweite Dimension ist die perzeptive Modalität mit einer visuellen gegenüber einer auditiven Ausprägung. Die dritte Dimension betrifft die visuelle Verarbeitung, die sich aufteilt auf eine fokale, zentrale Verarbeitung und eine periphere, umgebende Verarbeitung. Die vierte Dimension umfasst die Verarbeitungs-codes über die Perzeption, Kognition und Reaktionen hinweg. Die Verarbeitungs-codes können räumlich-manuell oder stimmlich-verbal sein [90, S. 163].

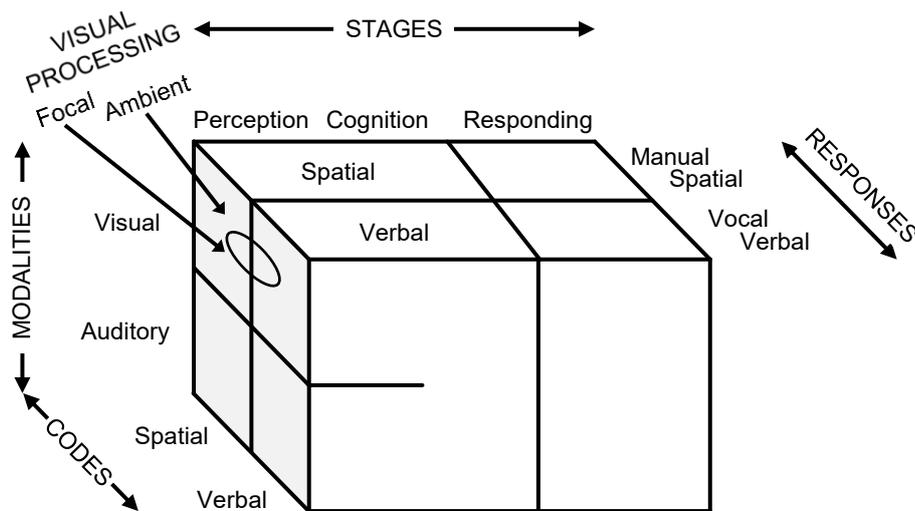


Abbildung 2.8: Multiple Ressourcen nach Wickens [90, S. 163].

Limitationen der Kapazitätsmodelle

Nach Dehais [91, S. 2] sind die Ressourcenmodelle schwierig zu operationalisieren. Er führt als Grund an, dass die Ressourcen eine Versinnbildlichung sind und daraus zwangsweise eine abstrakte Erklärungsebene resultiert [92]. Das erschwert eine eindeutige Operationalisierung. Die Analyse neurologischer Prozesse hat nach Dehais [91, S. 10] das Potential, die komplexen Zusammenhänge von Zuständen und Leistung genauer erläutern zu können.

Darüber hinaus beschränkt sich die Anwendbarkeit der Multiplen-Ressourcen-Theorie auf Multitasks mit einer großen Aufgabenlast [90, S. 160]. Sie kann nicht Leistungseinbußen erklären, deren Ursache zum Beispiel in einer Unterbeanspruchung oder in äußerer Monotonie liegt.

Zudem ist anzumerken, dass die Multiple-Ressourcen-Theorie nur einen Teil der komplexen, internen Abläufe des Informationsverarbeitungsprozesses erfasst. Sie schließt soziale, emotionale oder organisatorische Umstände nicht explizit ein, obwohl diese ebenfalls die Beanspruchung und Leistung beeinflussen [93]. Zudem wird die Motivation oder die Erfahrung nicht berücksichtigt [94, S. 2].

2.4 Mentale Beanspruchung

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der mentalen Überbeanspruchung ausgeführt. Außerdem wird auf die Messungen der mentalen Beanspruchung eingegangen.

2.4.1 Leistungseinbußen durch Überbeanspruchung

Yerkes und Dodson [95, S. 479] haben die Schnelligkeit der Verhaltensanpassung von Mäusen in Abhängigkeit der Stärke der ihnen bei Fehlverhalten verabreichten Elektroschocks untersucht und festgestellt, dass bei einer mittleren Schockstärke die größte Lerngeschwindigkeit erzielt wurde. Im Laufe der Zeit wurde daraus auf einen ähnlichen Belastungs-Leistungs-Zusammenhang beim Menschen geschlossen, der fortan das Yerkes-Dodson-Gesetz genannt wird und den

Verlauf der menschlichen Leistungsfähigkeit als ein umgekehrtes U über der Belastung darstellt. De Waard [14, S. 24] überträgt dieses Modell auf den Anwendungsfall der Fahrzeugführung, erweitert es um die subjektiv empfundene Beanspruchung und führt die Belastungsregionen D, A1-A3, B und C ein. Dies ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Das Modell besagt, dass in einem optimalen Leistungsbereich A2 die beste Leistung bei niedriger Beanspruchung erreicht wird. Bei einer steigenden Belastung durch die Aufgabe kann durch entsprechende Kompensation (= gefühlte Beanspruchung) die Leistung konstant gehalten werden (A3), bevor die Leistung in der Region B bei weiter steigender Beanspruchung einbricht und sich in der Region C auf einem vergleichsweise konstant niedrigen Niveau befindet (Überbeanspruchung). Es ist wichtig, anzumerken, dass nicht von einer Belastung auf eine Leistungsregion geschlossen werden kann, weil diese Zuordnung vom Individuum abhängig ist. Mit zunehmender Belastung werden die Regionen von D nach C durchschritten.

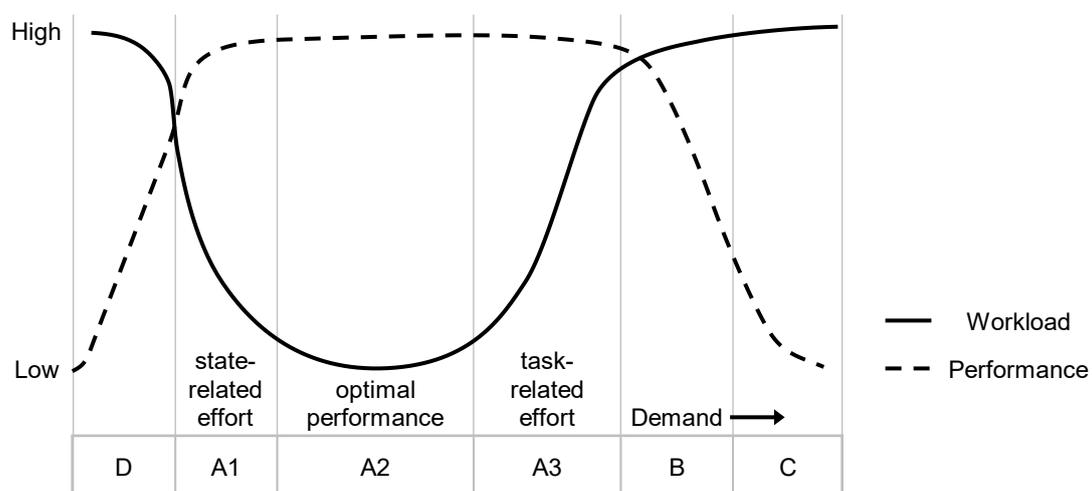


Abbildung 2.9: Workload-Performance-Modell nach De Waard [14, S. 24]

Der Übergang der Beanspruchung aus der Zone A3 in die Zone B hängt nicht nur von der Höhe der Belastung ab, sondern hat zudem eine zeitliche Komponente [14, S. 23]. Dauerhafte Anstrengungen oder häufig wiederkehrende Belastungsspitzen führen ebenfalls aus der Region A3 heraus in Stress [14, S. 23]. Daher schlägt De Waard [14, S. 23] vor, die maximal zulässige Beanspruchung beim Übergang der Region A2 zu A3 zu setzen.

2.4.2 Minderung des Situationsbewusstseins durch Überbeanspruchung

Endsley [96, S. 792] definiert das Situationsbewusstsein als „die Wahrnehmung der Elemente in der Umgebung innerhalb eines Zeit- und Raumvolumens, das Verständnis ihrer Bedeutung und die Vorausschau ihres Zustands in naher Zukunft“ (Übersetzung des Autors). Obwohl Endsley das Situationsbewusstsein im Kontext der Luftfahrt definiert hat, genießt das Konstrukt branchenübergreifend Ansehen. Für die Teleoperation von Straßenfahrzeugen ist ein korrektes Situationsbewusstsein ebenfalls grundlegend. Dies heißt im Speziellen, relevante Informationen wahrzunehmen, ihre Bedeutung zu verstehen und die zukünftige Situation vorhersehen zu können [97, 98].

Endsley definiert acht wesentliche, schädliche Einflussfaktoren auf das Situationsbewusstsein. Darunter sind unter anderem das Attentional Tunneling und Stressfaktoren wie mentale Beanspruchung oder Zeitdruck [99]. Stressfaktoren reduzieren die verfügbare Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses und befördern das Attentional Tunneling. Attentional Tunneling beschreibt das Phänomen, dass Operatoren sich auf einen Aspekt ihrer Umgebung fokussieren und ihr blickgesteuertes Scanverhalten einschränken, wodurch entscheidende Wahrnehmungsbereiche nicht mehr erfasst werden. Untersucht wurde dies bereits im Bereich der Luftfahrttechnik. Nur Piloten, die ein gleichverteiltes und umfassendes Umgebungsscanverhalten zeigten, waren in der Lage, unerwartete Ereignisse zu detektieren [100, S. 223].

2.4.3 Messverfahren der mentalen Beanspruchung

Das Ziel dieses Abschnittes ist die Vorstellung der Messverfahren zur Beanspruchungsmessung. Die Beanspruchungsmessung lässt sich in drei Kategorien unterteilen [101, S. 5]: Subjektiv, physiologisch und leistungsorientiert oder objektiv. Für eine präzise Bestimmung der Beanspruchung ist es üblich, mindestens zwei Messarten zu anzuwenden [101, S. 6].

Subjektive Messverfahren

Subjektive Metriken spielen bei der Erhebung von mentaler Beanspruchung eine zentrale Rolle. Sie folgen dem Prinzip, dass, wenn eine Person sich beansprucht fühlt, sie auch beansprucht ist [102, S. 105]. Vorteilhaft, nicht nachteilig, ist die Subjektivität dieses Messverfahrens, weil es individuelle Fähigkeiten, Zustände und Einstellungen berücksichtigt [103, S. 449]. Ein etabliertes Verfahren zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung ist der NASA Task Load Index (NASA TLX) [104]. Der NASA TLX nutzt sechs Dimensionen zur Erfassung der Beanspruchung. Er wurde speziell für automobiler Fahraufgaben angepasst und unter dem Namen Driving Activity Load Index (DALI) publiziert [105]. Die sechs Dimensionen des DALI sind *effort of attention*, *visual demand*, *auditory demand*, *temporal demand*, *interference* und *situational stress*. Das Messverfahren des DALI bleibt unverändert zum NASA TLX und ist zweistufig. In der ersten Stufe beurteilt die Versuchsperson nach jeder Aufgabe jede der sechs Dimensionen auf einer Skala von 0 bis 100 in 5er-Abstufungen. Im zweiten Schritt bestimmt er die Gewichtungsfaktoren der Dimensionen zueinander, woraus der globale DALI-Wert berechnet wird. Weil der zweite Schritt zusätzlichen Aufwand für die Versuchsperson bedeutet und dessen potentieller Mehrwert widersprüchlich diskutiert wird [106, S. 599] [107, S. 1853], entfällt er bei einigen Studiendesigns. Nach Hart [108, S. 906] kann auf den zweiten Schritt beim NASA TLX ohne einen Verlust an Aussagekraft verzichtet werden. Der globale Beanspruchungswert wird aus dem ungewichteten Mittelwert der Dimensionen gebildet und unter dem Namen *Raw TLX* berichtet.

Physiologische Messverfahren

In diesem Abschnitt wird der Stand der Wissenschaft bezüglich des Zusammenhangs zwischen der mentalen Beanspruchung und ihrer physiologischen Ausprägungen sowie deren Messung beleuchtet. Geistige Zustände und die Physiologie beeinflussen sich gegenseitig. Dies kann für die Messung der mentalen Beanspruchung vorteilhaft genutzt werden. Physiologische Messungen haben im Allgemeinen die Vorteile, dass sie kontinuierlich erfasst werden, die Aufgabe nicht wie bei der Beantwortung eines Fragebogens unterbrechen und nicht bewusst von den Versuchspersonen beeinflusst werden können.

„Das vegetative Nervensystem besteht aus den drei Teilen Sympathikus, Parasympathikus und enterischem Nervensystem.“ [109, S. 485] Es wird auch autonomes Nervensystem genannt, weil ihm die physiologischen Mechanismen unterliegen, ohne dass ein bewusster Zugriff oder eine bewusste Einflussmöglichkeit darauf bestehen [109, S. 485]. Sehr allgemein gesprochen wirkt der Sympathikus aktivierend auf den Gesamtorganismus ("fight and flight"), und der Parasympathikus inhibierend ("rest and digest"). Die Aktivität des vegetativen Nervensystems unterliegt nicht der willkürlichen Kontrolle; dennoch wird sie durch Hirnaktivitäten und entsprechende Zustände beeinflusst [109, S. 497]. „Emotionale Zustände wie Wut oder Angst werden durch die allgemeine Aktivierung des Sympathikus von starken vegetativen Reaktionen wie erhöhter Schweißsekretion, Herzrasen, Blutdruckerhöhung oder Pupillenerweiterung begleitet.“ [109, S. 498] Diese und weitere Zusammenhänge werden von der Neuroergonomie und der Physiologie untersucht. Die Physiologie ist im Wesentlichen an Messungen des peripheren Nervensystems (autonomes Nervensystem und somatisches Nervensystem) interessiert, die Neuroergonomie hauptsächlich an Messungen des zentralen Nervensystems (Gehirn und Rückenmark) [110, S. 185]. Die Neuroergonomie ist größtenteils auf teure, spezielle und für die Anwendung der Fahrzeugtechnik meist unpraktische Messverfahren wie eine Magnetresonanztomographie, eine Positronen-Emissions-Tomografie oder eine Elektroenzephalografie (EEG) angewiesen [110, S. 185] und wird deswegen in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Die Erforschung von geistigen Zuständen wie der mentalen Beanspruchung, deren Ursachen und deren physiologische Reaktionen kann nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Aufgrund der Vielzahl an wissenschaftlichen Erkenntnissen und der biologischen Wechselwirkungen besteht der Konsens, dass sich geistige Zustände sowie physiologische und neurologische Ausprägungen gegenseitig beeinflussen [111]. Eindeutig und vollständig sind diese Zusammenhänge jedoch keineswegs geklärt. Im Folgenden werden Erkenntnisse bezüglich des Zusammenhangs von mentaler Beanspruchung und physiologischen Ausprägungen gezeigt.

Hautleitwert

Die Schweißdrüsen werden vom Sympathikus angesteuert [112], nicht aber vom Parasympathikus [109, S. 486]. Ein Zusammenhang zwischen Reizverarbeitung und einer Veränderung des Hautleitwerts (HLW) wurde schon früh erkannt und für die Evaluation von kognitionspsychologischen Theorien verwendet [113–115]. Mit fortschreitender Erfahrung wurde die Sensitivität des HLW gegenüber einer Vielzahl an Einflüssen wie zum Beispiel Stress, Emotionen oder der Temperatur deutlich [14, S. 46, 116, S. 221]. Während die ekkrine Schweißproduktion vor allem der Wärmeregulation dient, werden für die Schweißproduktion an den Händen und Füßen, die durch mentalen Stress oder tiefe Atmung hervorgerufen wird, evolutionäre Prozesse verantwortlich gemacht, wodurch ein Abrutschen während des Fluchtverhaltens vermieden wird [117, S. 153]. Insgesamt geht eine gesteigerte, kognitive Beanspruchung mit einer Erhöhung der gemessenen HLW-Parameter einher [118–121]. Aufgrund der geringen Spezifität von HLW-Reaktionen bezüglich der Identifizierung eines konkreten Zustands wird empfohlen, unerwünschte Zustände oder Trigger durch das Versuchsdesign bestmöglich zu isolieren [116, S. 229] und mehrere Messarten wie z. B. die Herzaktivitätsmessung zur Erhebung der Zustände von Interesse zu verwenden [116, S. 229].

Die Bestrebungen, anhand von physiologischen Daten mentale Beanspruchungsniveaus zu identifizieren und den aktuellen, mentalen Beanspruchungszustand möglichst in Echtzeit zu bestimmen, machen aufgrund der günstiger und besser werdenden Hardware sowie der Verwendung von Machine-Learning-Verfahren Fortschritte [121, 122]. Sie kombinieren meist HLW-Messungen, Elektrokardiogramm-Messungen (EKG) und weitere Messungen. Wulvik [123,

S. 102] findet bei seiner Studie einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen zwei Schiffsleitwartenaufgaben unterschiedlicher Schwierigkeit in dem Großteil der ausgewerteten HLW-Größen. Ding [124] kann einen signifikanten Unterschied in den HLW-Größen bei unterschiedlichen, kognitiven Schwierigkeitsstufen feststellen und darauf basierend einen Klassifikator trainieren, der mit 78 % Genauigkeit die physiologischen Messabschnitte der korrekten Aufgabenschwere zuordnet – basierend auf HLW-, EKG-, EMG- und Atmungsmessungen. Der Klassifikator von Jiminez-Molina [125, S. 19] erzielt mit den Daten aus HLW-, PPG- und EEG-Messungen die besten Ergebnisse von 86 % Genauigkeit. Liu gelingt die Unterscheidung zwischen Pause, Stadt- und Highwayverkehr alleine auf Basis der HLW-Daten [126]. Zwar sind die Verfahren zur allgemeinen Verwendung noch nicht in ausreichendem Maß entwickelt, zwischen unterschiedlichen Aufgaben nicht ohne neues Training übertragbar und benötigen dementsprechend umfangreiche und klassifizierte Daten. Im Allgemeinen zeigen die Fortschritte aber, dass Phasen mentaler Beanspruchung mittels der HLW-Reaktionen erkannt werden können.

Definition einer idealen Hautleitwertreaktion

Der HLW setzt sich aus einer tonischen und phasischen Komponente zusammen [127, S. 3]. Über Stimuli können HLW-Reaktionen (phasische Komponente) getriggert werden, wie es in Abbildung 2.10 dargestellt ist. Das tonische Maß ist das Grundniveau, das sich langsamer über die Zeit verändert.

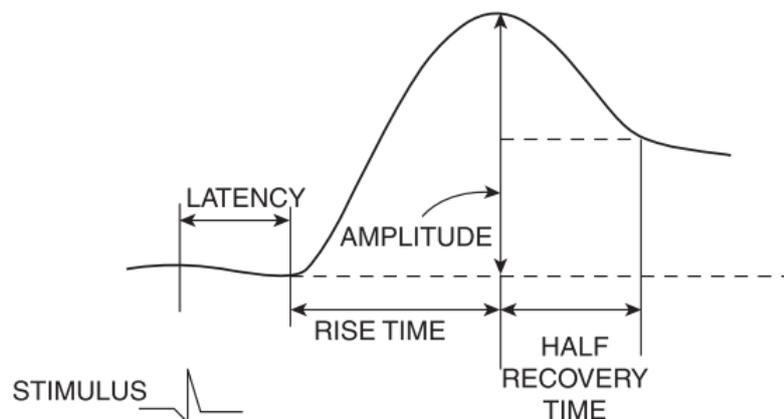


Abbildung 2.10: Grafische Darstellung der HLW-Komponenten nach Dawson [116, S. 225]

Dawson [116, S. 225] fasst in einer Übersicht elektrodermale Größen, ihre Definitionen und ihre typischen Werte zusammen. Einige davon sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Die typischen Werte sind üblich, jedoch können Werte außerhalb des genannten Bereichs auch valide sein, weil die Werte von Person zu Person und je nach Tätigkeit unterschiedlich sein können. Die Leitfähigkeit wird in Siemens (S) angegeben, wobei ein Siemens dem Kehrwert eines Ohm entspricht, $1 \text{ S} = 1 / 1 \text{ } \Omega$ [128, S. 1019]. Der typische Wertebereich für das tonische Maß liegt zwischen $2\text{-}20 \text{ } \mu\text{S}$. Üblicherweise nimmt die Hautleitfähigkeit während Pausen allmählich ab ($1\text{-}3 \text{ } \mu\text{S}$). Bei Stimuli steigt ($0,2\text{-}1,0 \text{ } \mu\text{S}$) sie mit einer Latenz von $1\text{-}3 \text{ s}$ an und sinkt anschließend wieder allmählich ab. Es können plötzliche Anstiege ohne Stimuli auftreten, die als unspezifische HLW-Reaktionen bezeichnet werden und typischerweise mit einer Häufigkeit von $1\text{-}3$ HLW-Reaktionen pro Minute auftreten.

Tabelle 2.1: Elektrodermale Größen, Definitionen und übliche Werte nach Dawson [116, S. 225]. Skin Conductance Level wird mit SCL abgekürzt, Skin Conductance Response mit SCR und Non-Specific Skin Conductance Response mit NS-SCR.

Größe	Definition	Typische Werte
SCL	Tonisches Niveau der elektrischen Hautleitfähigkeit	2-20 μS
SCL-Veränderung	Allmähliche Veränderung des tonischen Niveaus	1-3 μS
NS-SCR_freq	Häufigkeit von unspezifischen SCR	1-3 pro Minute
SCR_ampl	Phasischer Zuwachs in der Hautleitfähigkeit	0,2-1,0 μS
SCR_latency	Zeit zwischen Stimulus und SCR-Beginn	1-3 s
SCR_rise_time	Zeit zwischen SCR-Beginn und SCR-Maximum	1-3 s
SCR_half_rec_time	Zeit zwischen SCR-Maximum und halber Absenkung der SCR-Amplitude	2-10 s

Nach dem Erreichen der Amplitude folgt ein Abfallen des HLW, der langsamer als der Anstieg verläuft. Der Verlauf ähnelt üblicherweise einem exponentiellen Abfall [128, S. 1026].

Die HLW-Reaktionsamplituden liegen typischerweise zwischen 0,2-1,0 μS . Meist wird zur Identifikation einer HLW-Reaktion eine minimale Amplitude von 0,01 μS bis 0,05 μS vorausgesetzt, um auch HLW-Reaktionen außerhalb des typischen Bereichs zu erfassen [116, S. 225].

Hautleitwertkenngrößen

Boucsein [129, S. 151] unterteilt die aus den HLW-Messungen ableitbaren Kenngrößen in phasische und tonische Maße. Für deren Bestimmung ist zunächst eine Aufteilung der HLW-Messung in die tonische und phasische Komponente notwendig.

Die phasischen Kenngrößen richten sich an den HLW-Reaktionen aus. Häufig verwendet werden die durchschnittlichen Amplitudenwerte [129, S. 152], die Fläche der phasischen HLW-Reaktionen (area under curve) [129, S. 165] oder die Anzahl der HLW-Reaktionen innerhalb eines zeitlichen Intervalls [121, S. 179]. Die tonischen Kenngrößen beschreiben den HLW ohne die phasischen Reaktionen. Dazu zählen im Wesentlichen das durchschnittliche HLW-Niveau [129, S. 173] und die Standardabweichung des HLW-Niveaus.

Damit aussagekräftige Mittelwerte bestimmt werden können, bedarf es für die Berechnung eine Mindestintervalldauer. Bei Langzeitmessungen (24h) werden die Daten üblicherweise in 5 Minutenintervalle geteilt [129, S. 132]. Birjandtalab [130, S. 111] erstellt einen physiologischen Datensatz und wählt für die Dauer der Aufgaben 5 min. Lutin [121, S. 178] wählt für ihre Auswertung 64 s lange Zeitfenster. Eine klar definierte Grenze für den minimalen Wert eines Intervalls zur Auswertung gibt es bislang nicht. Die üblichen Zeitfenster liegen über 60 s.

Elektrokardiogramm

Die Herzaktivität wird vom Sympathikus und Parasympathikus gesteuert [131, S. 1054]. In Bezug auf die Herzfunktion agieren sie antagonistisch [109, S. 485]. Die Herzaktivitätsmessgrößen basieren auf der Erhebung der RR-Intervalle. Die R-Zacke ist das markanteste Merkmal im QRS-Komplex und wird zur Bestimmung der Herzfrequenz herangezogen [132, S. 23]. In der Abbildung 2.11 ist der schematische Ablauf eines QRS-Komplexes dargestellt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden R-Zacken wird RR-Intervall genannt.

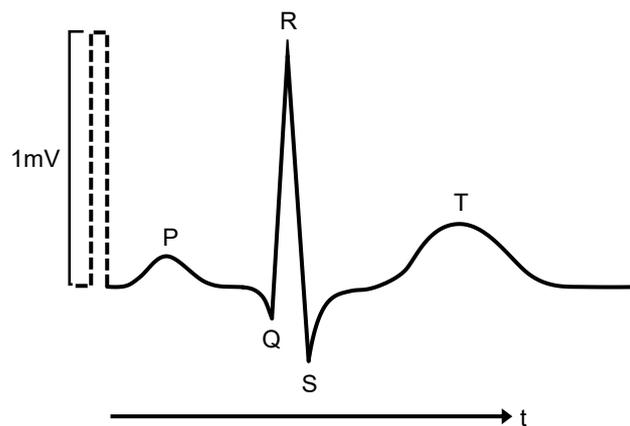


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines QRS-Komplexes nach Brandes [133, S. 202]

Shaffer [134] kategorisiert die daraus erstellten Größen in Zeitbereichsgrößen, Frequenzbereichsgrößen und nicht lineare Größen. Bei den Zeitbereichsgrößen sorgt eine steigende, mentale Beanspruchung im Wesentlichen für eine reduzierte Herzratenvariabilität (HRV) [135, S. 41]. Delliaux [136, S. 6] stellte bei Konzentrations- und Schnelligkeitsaufgaben eine signifikante Veränderung von 13 Herzaktivitätsmessgrößen unter mentaler Beanspruchung im Vergleich zu Ruhemessungen fest. Ebenso konnte ein ähnlicher Zusammenhang bei einer Reihe weiterer Experimente berichtet werden [135, 137–142]. Heine [135, S. 41] stellt fest, dass die auf einem EKG basierenden Messgrößen zum Feststellen von Beanspruchungsunterschieden herangezogen werden können. Es sollten aber mehrere Größen bestimmt werden, weil kein Maß für sich genommen alle unterschiedlichen Stufen der Beanspruchung erkennen konnte [135, S. 41]. Meteiers Algorithmus [143, S. 16] zur Klassifizierung der mentalen Beanspruchung verlässt sich neben den Atmungsmessungen größtenteils ebenfalls auf EKG-Kenngrößen.

Zeitbasierte HRV-Kenngrößen

Die HRV-Kenngrößen unterteilen sich in zeitbasierte, frequenzbasierte und nichtlineare Kenngrößen [134]. Nach Shaffer [134, S. 1012] gibt es keine pauschale Empfehlung, wann welche Kenngrößenkategorie zu verwenden ist. Er empfiehlt, sich an Veröffentlichungen aus ähnlichen Anwendungsgebieten zu orientieren. In einigen der oben aufgeführten Veröffentlichungen spielen die zeitbasierten HRV-Kenngrößen eine wichtige Rolle, weil sie mit unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus korrelieren [135, 137–142]. Deswegen wird in dieser Arbeit nur auf die zeitbasierten HRV-Größen eingegangen. Üblicherweise verwendete Größen sind die Standardabweichung der RR-Intervalle und die Quadratwurzel des Mittelwerts über alle Quadrate der Differenzen aufeinanderfolgender RR-Intervalle. Weil es sich bei den Werten um gemittelte Werte handelt, ist ebenfalls eine minimale Zeitspanne für die valide Auswertung der Daten notwendig. Shaffer empfiehlt für diese beiden Größen eine Mindestintervalldauer von 60 Sekunden ([144], entnommen aus [134, S. 1008]).

Leistungsbasierte Messverfahren

Den leistungsbasierten oder objektiven Messgrößen liegt die Theorie der Kapazitätsmodelle zugrunde (Abschnitt 2.3.3). Wird eine Performanceverschlechterung festgestellt, wird angenommen, dass dem ein Ressourcenbedarf vorausgegangen ist, der die vorhandenen Ressourcen

überschritten hat und mentale Beanspruchung zur Folge gehabt haben muss [101, S. 21]. Häufig verwendete Größen zur Messung der Performance sind Lenkradbewegungen [145], das Spurhalteverhalten oder die Geschwindigkeit an sich [146].

Performancebasierte Messgrößen sind für Aufgaben mit hoher Arbeitsbelastung passend [101, S. 23]. Bei Aufgaben mit moderater Arbeitsbelastung sind diese Maße nicht sensitiv, weil die Leistung erst bei einer hohen Beanspruchung leidet.

2.4.4 Mentale Beanspruchung bei Teleoperation

Die Teleoperation, besonders die DS, ist eine mental-fordernde Tätigkeit. So maß Georg [13, S. 5] bei einer Realfahrzeugstudie zur Teleoperation durchschnittlich einen „mental demand“ von 70 auf der Skala von 0 bis 100 (NASA TLX). Alle weiteren Studienergebnisse dieses Abschnitts entstanden in einer simulativen Umgebung. Bei Chucholowski [76, S. 79] treten erhöhte NASA-TLX Werte des mental demands von 75,8 ohne Predictive Display und 51,6 mit Predictive Display auf. Vermutlich ist dies zu einem großen Teil der damals vorliegenden Gesamtlatenzzeit von über 600 Millisekunden geschuldet, die aktuell ungefähr bei 200 Millisekunden [79, S. 6] liegt (Abschnitt 2.2.3). Moya [147] erhält bei der direkten Teleoperation eines Roboters ebenfalls unter Latenz erhöhte Beanspruchungswerte von 84,1.

Auch in dem Bereich der DS von unbemannten Luftfahrzeugen wird eine erhöhte Beanspruchung der Operatoren festgestellt. Courtois [148, S. 167] misst ohne Kollisionsassistenzsystem einen durchschnittlichen NASA TLX Wert von 57. Bei Lam [149, S. 833] stellt sich ohne haptisches Feedback ein Durchschnittswert von über 60 ein. Im Bereich der Teleoperation von Gabelstaplern treten bei Chew [150] durchschnittliche NASA TLX Werte von 56 auf. Auch bei Kranfernsteuerungen können erhöhte Beanspruchungswerte auftreten [151].

2.4.5 Akzeptable mentale Beanspruchung

Bei der maximalen Grenze einer akzeptablen Beanspruchung („red line“) wird unterschieden, ob es sich um eine Einzelaufgabe oder um mehrere, gleichzeitig zu verrichtende Aufgaben handelt. Bei Einzelaufgaben gibt es für ausgewählte Charakteristika Erfahrungswerte bezüglich Grenzen, die nicht überschritten werden sollten [152, S. 229]. Beispielsweise liegt die Anzahl an Einheiten, die ein Mensch üblicherweise im Kurzzeitgedächtnis behalten kann, zwischen fünf bis sieben Einheiten. Dementsprechend kann eine maximale Grenze konservativ bei maximal vier gleichzeitig im Kurzzeitgedächtnis zu behaltende Einheiten festgelegt werden [152, S. 231]. Speziell für mehrere, gleichzeitig zu verrichtende Aufgaben gibt es bei der Anwendung der Multiplen-Ressourcen-Theorie bis jetzt keine festgelegte, maximale Beanspruchungsgrenze [152, S. 226]. Das liegt daran, dass es zwischen den Menschen Unterschiede zum einen in den Fähigkeiten, der Leistung oder der Motivation, zum anderen im Umgang mit Beanspruchung gibt [94, S. 10]. Es wird stattdessen empfohlen, vor einer Gestaltung oder Entwicklung theoretische Untersuchungen anzustellen, die Aufgabenbereiche mit erhöhter Beanspruchung identifizieren (sog. „red flags“) und Gegenmaßnahmen zu ergreifen, wenn sich ein Leistungseinbruch bei den stattfindenden Untersuchungen bewahrheitet [152, S. 231]. Die Maßnahmen können eine Systemüberarbeitung, eine Neuplanung der Aufgaben oder ein Training der Personen sein [152, S. 231].

Um dennoch übliche Wertebereiche der Beanspruchung auf Basis des NASA TLX zu bekommen, analysierte Grier in einer Metaanalyse globale NASA TLX Werte [153]. Dadurch ist es

möglich, im Anschluss an eine Auswertung anzugeben, ob die erhobenen Werte eher in einem Bereich von niedriger, mittlerer oder hoher Beanspruchung liegen. Für die Untersuchungskategorie Autofahren liegt der Median bei 41,52. Darin sind Simulator- sowie Realfahrzeuguntersuchungen enthalten. Das untere Quartil liegt bei einem Wert von 28,05 und das obere Quartil bei einem Wert von 51,73 [153, S. 1729]. Der minimale Wert beträgt 15,00 und das Maximum 68,50. Dieser Bereich kann als Anhaltspunkt für spätere Interpretationen dienen. Die Metaanalyse schlüsselt den Median allerdings nicht nach den einzelnen Dimensionen des NASA TLX auf und betrachtet keine Performanceveränderungen [153, S. 1730].

2.5 Menschliche Wahrnehmung

In diesem Abschnitt werden neurowissenschaftliche und anatomische Erkenntnisse bezüglich der menschlichen Wahrnehmung vorgestellt. Sie sind die Grundlage für die Analyse der Auswirkungen des Teleoperationssetups auf die menschliche Wahrnehmung, die im Laufe dieser Arbeit stattfindet.

2.5.1 Anatomische Grundlagen des Sehens

Die Bildqualität einer Kamera kann nicht direkt mit dem Sehen des menschlichen Auges verglichen werden. Die ca. 125 Millionen Lichtsinneszellen des menschlichen Auges konvergieren zu ca. 1 Million Ganglienzellen, was in der Anzahl geringer ist als die Pixelanzahl einer aktuellen Digitalkamera [154, S. 37]. Das Ziel des menschlichen Sehens ist das Erkennen von Objekten. Dafür reicht die Auflösung an Zapfen in der Fovea aus die ständig über unsere Umwelt schweift und der Bereich des schärfsten Sehens in der Netzhaut ist. In ihr sind nur die für das Farbsehen zuständigen Zapfen vorhanden [154, S. 37]. Sie hat eine Auflösung von ca. einer Bogenminute [155, S. 39]. Im Vergleich dazu hat eine Spiegelreflexkamera [156] mit einem passenden Standardobjektiv [157] eine deutlich feinere Auflösung von ca. 21 Bogensekunden. Zur Netzhautperipherie hin nimmt die Dichte der Zapfen ab [154, S. 48], so dass schon 10° außerhalb der Fovea die Sehschärfe nur noch 10 % beträgt [155, S. 40].

Das Farbsehen und das Bewegungssehen sind zwei unterschiedliche Sehpfade und werden als weitgehend separierte visuelle Systeme betrachtet [154, S. 54]. Das Farbsehen ist „diejenige Empfindung, die es uns erlaubt, Objekte mühelos voneinander zu unterscheiden, die aufgrund ihrer Textur nur schwer voneinander zu trennen sind“ [154, S. 46]. Als Beispiel kann man sich hier die Unterscheidung von Blüten und Blättern auf einem Blumenbild vorstellen. Die Unterscheidung ist in einem entsprechenden Graustufenbild nur schwer möglich.

2.5.2 Bewegungssehen

Das Bewegungssehen ist eine eigenständige, visuelle Dimension ähnlich zum Farbsehen [154, S. 54]. Das Bewegungssehen ist keine aus anderen Prozessen abgeleitete Dimension, wie sie zum Beispiel als eine auf der Analyse von sensorischen Größen wie Raum und Zeit basierende Dimension konstruiert sein könnte [154, S. 54]. Es gibt viel mehr ein vom Farbsehen separiertes System im Gehirn, das für die Analyse von Bewegungen zuständig ist [154, S. 54]. Die erste Stufe (middle temporal visual area) reagiert allgemein auf jegliche, retinale Bewegung. Die Bewegungen sind dort in einem retinalen Koordinatensystem dargestellt. Die darauf folgende Stufe

(middle superior temporal visual area) verarbeitet komplexere Bewegungsmuster unter der Einbeziehung von extraretinalen Signalen - also somatosensorisch, auditorisch oder über die Position des Kopfes und der Augen - und stellt die Bewegung eines Objekts in einem eigenbewegungsinvarianten Weltkoordinatensystem dar [154, S. 57]. Trotz der eigenen Bewegung und der Bewegung der Augen nehmen wir eine ansonsten unbewegte Umgebung als stationär wahr. Bewegungen in einer stationären Umgebung fallen auf und bekommen unsere Aufmerksamkeit. Mit der fokalen Wahrnehmung und mit Hilfe von langsamen Augenfolgebewegungen werden diese Objekte genauer betrachtet [154, S. 62].

2.5.3 Eigenbewegungswahrnehmung

Die Wahrnehmung der eigenen Bewegung stützt sich im Wesentlichen auf den Vestibularapparat, retinale Flussfelder und das Gehör.

Der Vestibularapparat befindet sich im Innenohr und registriert sämtliche Beschleunigungen [158]. Er liefert wie andere Organe auch Signale, die in einem Zentrum für das Ortsgedächtnis und der Navigation verarbeitet werden [154, S. 252]. Dieses Zentrum ist wiederum mit anderen Zentren in ein System eingebunden, in dem Informationen über Objekte, Entfernungen und Richtungen dieser Objekte abgespeichert werden [154, S. 252]. Die wahrgenommenen Beschleunigungen des Vestibularapparats werden folglich neben anderen Informationen für die Bestimmung der Lage und der Bewegung im Raum herangezogen [154, S. 255].

Retinale Flussfelder spielen eine zentrale Rolle für das Eigenbewegungsempfinden, indem sie Vektion erzeugen können. Vektion bezeichnet das Phänomen, dass eine Person allein aufgrund der visuellen Wahrnehmung das Gefühl hat, sich in einer sonst statischen Umgebung zu bewegen, obwohl sie sich darüber im Klaren ist, dass sich die Umgebung bewegt und nicht sie selbst. Als Beispiel wird gerne die Situation beschrieben, in der man in einem Zug sitzt und das Gefühl hat, dass der eigene Zug losfährt, obwohl sich der Zug auf dem Nachbargleis in Bewegung setzt. Dieser Effekt wird verstärkt, je eindeutiger die visuellen Anhaltspunkte dafür sind (Muster und Farbe) [159].

Darüber hinaus unterstützt das Gehör über die Wahrnehmung einer veränderten Geräuschkulisse die Einschätzung der eigenen Fahrgeschwindigkeit [160, S. 8].

2.5.4 Tiefenwahrnehmung

Die Tiefenwahrnehmung setzt sich aus der monokularen und binokularen Tiefenschätzung zusammen. Während die binokulare Tiefenschätzung (Stereopsis) vor allem zum dreidimensionalen Sehen im Nahfeldbereich beiträgt, nimmt die monokulare Tiefenwahrnehmung entfernungsunabhängig eine entscheidende Rolle bei der Tiefenwahrnehmung ein.

Die monokulare Tiefenwahrnehmung beruht vermutlich weitestgehend auf der Bewegungsparallaxe [154, S. 62]. „Der Bewegungsparallaxe liegt die Tatsache zugrunde, dass sich Objekte, die sich in der Nähe des Beobachters befinden, schneller relativ zueinander und zum Betrachter bewegen als weiter entfernte Dinge“ [154, S. 62]. Über diesen Zusammenhang kann sehr eindrücklich Tiefe auch ohne Stereopsis erzeugt werden.

Die Stereopsis (=binokulare Tiefenwahrnehmung) ist eng mit dem Bewegungssehen verknüpft. „Tatsächlich hat das System des Bewegungssehens das wesentliche Element der Stereopsis

inkorporiert: Es ist sensitiv für retinale Disparität.“ [154, S. 63] Der retinalen Disparität liegt zugrunde, dass wir die Welt mit den beiden Augen aus etwas anderen Blickwinkeln sehen. Nur das von uns Fokussierte und das auf der entsprechenden gekrümmten Bahn Liegende (Horopter) weist auf der Retina keine Disparität auf [154, S. 63]. Besonders im nahen Bereich (<20 m) trägt die Stereopsis zur Tiefenwahrnehmung bei [161, S. 103]. Die retinale Disparität trägt neben den beschriebenen Effekten zum Tiefensehen bei, ist aber nicht alleinig dafür verantwortlich [154, S. 63]. McIntire [162] fasst 162 Veröffentlichungen mit 184 Experimenten zum Vergleich von 2D und 3D Bildschirmen zusammen. Im Vergleich zu den 2D Bildschirmen bieten 3D Bildschirme dem Betrachter den Kanal der Stereopsis an. McIntire kommt zu dem Schluss, dass die Stereoskopie nur bei bestimmten Aufgaben zu einer verbesserten Leistung führt. Dazu zählen Handhabungsaufgaben und Aufgaben, die wesentlich das Finden, Identifizieren und Klassifizieren von Objekten einschließen [162, S. 23]. Unter anderem ist sie auch vorteilhaft, wenn die Aufgaben besonders schwer sind oder von Anfängern bearbeitet werden [162, S. 23]. Keine Vorteile, aber auch keine Verschlechterung, bringt die Stereoskopie bei Aufgaben, die ausreichend Anhaltspunkte für monokulare Tiefenwahrnehmung bieten, die bereits gut erlernt sind, die keine Tiefeninformationen benötigen oder deren Tiefeninformationen außerhalb der für Stereoskopie relevanten Reichweite liegt [162, S. 23]. Die Stereopsis kann folglich bei bestimmten Aufgaben nützlich sein; bei einigen Aufgaben muss sie aber für eine gute Leistung nicht vorhanden sein.

2.5.5 Auswirkungen der Latenzzeiten auf die Teleoperationsleistung

Es wurden bereits einige Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die Auswirkungen von Latenzzeiten auf die Leistung eines menschlichen Operators zu bestimmen. Die erbrachte Leistung nimmt grundsätzlich mit zunehmender Latenz ab [70, S. 8, 163, S. 87, 164]. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren kann keine eindeutige, maximale Latenzzeitgrenze bestimmt werden, unter welcher eine Teleoperation sinnvoll durchführbar ist. Der Umgang mit Latenz ist unter anderem von individuellen Fähigkeiten, dem Kenntnis- und Trainingsstand [71, S. 96], der Motivation und der Aufgabe an sich [69, S. 217] inklusive Umgebung, gefahrener Geschwindigkeit und wechselseitigen Interaktionen abhängig. Pongrac [69, S. 189] kommt aufgrund ihrer Literaturrecherche zu dem Schluss, dass Latenzzeiten zwischen 75 – 370 ms zwar vom menschlichen Operator wahrgenommen werden, aber noch keinen Effekt auf die Leistung zeigen. Dieses Intervall ist vergleichsweise groß. Die Signifikanztestung einiger Studien bestätigen unabhängig davon dieses Intervall [67, 165, S. 591]. Neumeier [166, S. 194] hingegen findet einen signifikanten Performanceunterschied zwischen keiner zusätzlichen Latenz und einer zusätzlichen Latenz von 300 ms, nicht jedoch zwischen keiner zusätzlichen Latenz und einer zusätzlichen Latenz von 150 ms. Blissing [70, S. 8] hingegen findet signifikante Unterschiede in der lateralen Abweichungen zur Ideallinie zwischen 127 Millisekunden, 186 Millisekunden und 349 Millisekunden Latenz. Bei zusätzlichen Latenzzeiten von über 400 Millisekunden werden im Allgemeinen deutliche Leistungseinbußen [71, S. 93] und der Übergang zur Move-and-Wait-Strategie festgestellt [67].

Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse bisheriger Studien zu Latenzzeituntersuchungen nur bedingt verglichen werden können, weil bei einigen Latenzzeituntersuchungen keine Angaben zur Methode der Latenzzeitmessung gemacht wurden. Es kann sein, dass nur die zusätzlichen, softwareseitig künstlich beaufschlagten Latenzzeiten angegeben sind, nicht jedoch die bereits

ohne zusätzliche Latenzzeit vorhandene Systemlatenzzeit, die alleine wegen des Setups bestehend aus Eingabegeräten, Simulationstaktung und der Anzeige über Monitore oder Beamer entsteht. Diese ist systemabhängig und kann bis zu 150 Millisekunden betragen [167, 168, S. 45].

2.6 Ableitung der Forschungsfragen aus dem Stand der Wissenschaft

Identifikation des Anwendungsgebiets der Teleoperation

Die Teleoperation kann als Technologie in vielen Domänen zum Einsatz kommen. Im Bereich der Straßenfahrzeuge stellt sie beispielsweise eine Möglichkeit dar, um AF in Grenzfällen zu unterstützen. Dies wird als Motivation und Gegenstand einiger Untersuchungen angenommen [59, 74, 75]. Als Grenzfälle werden hierbei einzelne Szenarien und Konstellationen aufgegriffen und teilweise beschrieben. Dabei kann es sich beispielsweise um das Umfahren eines im eigenen Fahrstreifen befindlichen Fahrzeugs über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs [63, S. 28] oder um eine Verkehrssituation handeln, in der ein Polizist den Verkehr regelt [169, S. 1808]. Im Allgemeinen gehen folglich Veröffentlichungen zur Vorstellung von Teleoperationskonzepten nicht oder nur bedingt auf die Szenarien ein, deren Lösung sie anstreben. Die Entstehung des Grenzfalles oder dessen Verortung innerhalb der Systemarchitektur eines AF bleiben aus. Ein tieferes Verständnis für die Entstehung des Grenzfalles kann jedoch ein effektiveres Teleoperationskonzept ermöglichen. Zudem geben die Veröffentlichungen von Teleoperationskonzepten keinen Überblick über die Grenzfälle.

Anhand des Kontextes eines technischen Systems (AF) im öffentlichen Raum existieren viele mögliche, relevante Szenarien für die Leitwarte. Kettwich [170] stellt einen Überblick über relevante Szenarien vor. Sie identifiziert Szenarien für die Leitwarte und die Teleoperation über ein iteratives Verfahren mit Leitwartenpersonal des öffentlichen Nahverkehrs und Verkehrsforschern, über Interviews mit Sicherheitsfahrern von AF und über die Analyse von AF-Videoclips. Die Bandbreite der Szenarien erstreckt sich von Vandalismus über verschmutzte Sensoren bis hin zu Detektionsproblemen von AF. Auf die technischen Hintergründe der AF-Probleme wird nicht näher eingegangen. Folglich existiert ein Überblick über mögliche Szenarien für die Teleoperation, dieser ist jedoch nicht tiefgehend. Die technischen Gründe für die Entstehung der Grenzfälle sind nicht bekannt, ebenso deren Verortung innerhalb der AF-Systemarchitektur. Für die passende Entwicklung von Teleoperationskonzepten sind diese entscheidend.

Forschungsfrage 1

Welche konkreten Anwendungsfälle muss die Teleoperation lösen können und wie ist ihr Entstehungsmechanismus?

Wissen über die Entstehung der mentalen Beanspruchung während der Teleoperation

Im Stand der Wissenschaft wurden Fortschritte und Erkenntnisse des Teleoperierten Fahrens vorgestellt. Im Wesentlichen kristallisieren sich drei Kategorien heraus: Entwicklung neuer Steuerungsarten (Abschnitt 2.2.2), Verbesserung der Darstellung (Abschnitt 2.2.2) und Reduktion

der Latenzzeiten (Abschnitt 2.2.3). Die Entwicklung neuer Steuerungsarten und die Reduktion der Latenzzeiten verfolgen im Wesentlichen das Ziel, den Operatoren eine präzise und kollisionsfreie Steuerung zu ermöglichen. Die Verbesserung der Darstellung hat im Wesentlichen das Ziel, das Situationsbewusstsein der Operatoren zu erhöhen und die präzise Steuerung zu verbessern. Im Zusammenhang mit diesen Entwicklungen wird die mentale Beanspruchung häufig beiläufig mittels des NASA TLX erhoben. Die wesentlichen Thesen sind, dass eine Verbesserung der Steuerungsarten und der Latenzzeiten mit einer Reduktion der mentalen Beanspruchung einhergeht und dass die Darstellungsverbesserung die mentale Beanspruchung reduziert und damit die Fähigkeiten zum Erwerb eines möglichst vollständigen Situationsbewusstseins erhöht (Abschnitt 2.4.2). Diese Thesen können in manchen Fällen bestätigt werden [76, S. 79, 147, S. 5]. Zusammenfassend fehlt jedoch ein grundsätzliches Verständnis, wie die mentale Beanspruchung bei der Teleoperation entsteht.

Forschungsfrage 2

Wie entsteht bei der Teleoperation mittels der DS mentale Beanspruchung und im Besonderen Überbeanspruchung?

Vergleich der mentalen Beanspruchung zwischen Steuerungsarten

Die mentale Beanspruchung ist ein entscheidender und zu berücksichtigender Faktor bei der Anwendung der Teleoperation. Aufgrund von Überbeanspruchung sinkt die Leistungsfähigkeit (Abschnitt 2.4.1) und die Fähigkeit, sich ein korrektes Situationsbewusstsein aufzubauen (Abschnitt 2.4.2). Das fördert die Entstehung von Fehlern und ist bei sicherheitskritischen Anwendungen zu vermeiden. Während mit Hilfe der Verbesserung der Darstellung bereits eine Reduktion bei der mentalen Beanspruchung erzielt werden konnte [73, 76, 77], wird auch durch neuartige Teleoperationsarten eine Reduktion der mentalen Beanspruchung erwartet [59, 72]. Dies wurde bisher jedoch noch nicht untersucht. Weil es sich bei einigen Teleoperationsarten um Patente handelt, ist ebenfalls keine Evaluation bezüglich der mentalen Beanspruchung verfügbar [53, S. 40, 54, S. 15, 60–62, 63, S. 28]. So stellt sich die Frage, ob die mentale Beanspruchung auch in der Praxis mittels neuartiger Teleoperationsarten reduziert werden kann. In dieser Arbeit wird das konkret an der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung (MMW) untersucht.

Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, unterstützt zudem das Aufkommen der Leitwarte und insbesondere der Technischen Aufsicht für AF die Verschiebung von Tätigkeiten von dem Operatorarbeitsplatz hin zu einem Leitwartenarbeitsplatz (Wirtschaftlichkeit). In diesem Kontext gewinnt zudem die Frage an Relevanz, ob diese Verschiebung aus Sicht der psychischen Arbeitsbeanspruchung der bedienenden Person positiv zu bewerten ist.

Zudem ist die MMW vielversprechend, weil Walch [171] im Kontext einer Interaktionsgestaltung mit einem automatisierten Fahrzeug bei einer ähnlichen Aufgabe niedrige NASA-TLX Werte ermittelt hat. Walch sucht nach geeigneten, auf Kooperation basierenden Interaktionskonzepten zwischen der Fahrzeugautomatisierung und einem in diesem Fahrzeug sitzenden Nutzer. Hauptsächlich unter dem Aspekt der Nutzerfreundlichkeit führt er eine Probandenstudie zu Interaktionsmodalitäten (Button drücken oder Spracheingabe) seines Konzepts durch, bei dem der Nutzer die Bestimmung der Klassen für Schilder und Ampelsignale übernimmt, die die maschinelle Wahrnehmung nicht interpretieren kann [171, S. 63-71]. Dem inbegriffen sind Schilder, die von der Automation ignoriert werden können. Je nach Ausgestaltung der Interaktion erhält Walch im Durchschnitt NASA-TLX Werte von 29 bzw. 32,5 [171, S. 68]. Das sind niedrige Werte

auf der Skala von 0 bis 100. In der Aufgabenart ähnelt das Interaktionskonzept der MMW, weil die Hauptaufgabe des Bedieners die Interpretation von Objekten ist. Das System wird jedoch nicht mit alternativen Steuerungsarten wie der DS verglichen. Der Unterschied bezüglich der psychischen Beanspruchung zwischen den Steuerungsarten wurde bislang nicht evaluiert. Zudem handelt es sich bei Walch aufgrund des im Fahrzeug sitzenden Bedieners nicht um eine Teleoperation.

Forschungsfrage 3

Reduziert eine Situationslösung mittels der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung die mentale Beanspruchung der Operatoren im Vergleich zu der direkten Steuerung?

Vergleich der Situationslösedauer zwischen Steuerungsarten

Allgemein sind Situationslösedauern von Operatoren im Kontext der Teleoperation von Straßenfahrzeugen bisweilen nicht bekannt. Die Teleoperation als Rückfallebene für technische Probleme wird in einem betriebswirtschaftlichen Kontext Anwendung finden. Daher ist die Reduktion der Problemlösedauer von Interesse. Die MMW ermöglicht theoretisch aufgrund von mehreren Gegebenheiten eine schnellere Problemlösung als die DS. Zum einen kann bei der MMW nach dem Überfahren des markierten Bereichs während der Fahrt an die Automation übergeben werden. Bei der DS hingegen wird für die Rückübergabe von Operator zur Automation ein Stillstand als notwendig angenommen. Zum anderen ist zu erwarten, dass die Automation gerade enge Szenarien schneller passieren kann und sich dadurch die Situationslösedauer reduzieren lässt.

Für die Dauer zum Erkennen einzelner Objektklassen und deren Eingabe liefert Walchs Untersuchung Durchschnittswerte von 4,0 s bzw. 5,4 s [171, 69f]. Es wurde gemessen, wie lange die Versuchspersonen nach einer Benachrichtigung benötigen, um mittels der unterschiedlichen Interaktionskonzepte die Objektklassifikation und die Relevanz des Objekts auszudrücken. Die Objekte wurden auf Schilder und Ampelsignale beschränkt. Diese Zeit kann als Richtwert für die Erkennung und Eingabe von Objektklassen anhand eines Videos verstanden werden und kann auf das in dieser Arbeit vorgeschlagene Konzept als entsprechender Wert für diese Teilaufgabe übertragen werden. Eine Aussage, ob Szenarien mit Hilfe der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung schneller gelöst werden können, kann auf Basis dieser Untersuchung jedoch nicht getroffen werden.

Forschungsfrage 4

Reduziert der Ansatz zur Situationslösung mittels der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung die Bearbeitungsdauer im Vergleich zu der direkten Steuerung?

3 Methodik

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen dargestellt. Es wird zunächst das gewählte Makrovorgehen beschrieben (Abbildung 3.1). Im Anschluss sind die Methoden innerhalb der einzelnen Schritte des Makrovorgehens näher ausgeführt.

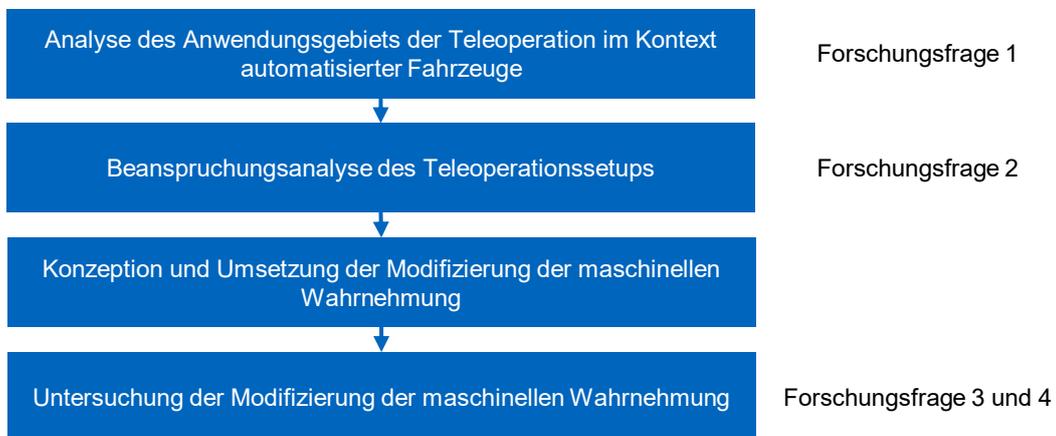


Abbildung 3.1: In dieser Arbeit gewähltes Makrovorgehensmodell

Der erste Schritt einer Entwicklung ist die Analysephase [172, S. 39], bestehend aus der Analyse der Nutzer und der technischen Anwendung. Die Analyse der technischen Anwendung beinhaltet die Identifikation der Unzulänglichkeiten von AF und folglich die Anwendungsszenarien der Leitwarte und der Teleoperation. Für eine effektive Unterstützung durch die Teleoperation ist das Wissen über den Entstehungsmechanismus der Unzulänglichkeiten hilfreich. Aus Sicht einer Leitwarte haben sich bereits Kettwich und Schrank [170, 173] mit der Identifizierung möglicher Szenarien befasst. Wie in Abschnitt 2.6 vorgestellt, sind einige Unzulänglichkeiten bekannt, nicht jedoch deren Entstehungsmechanismus. Deswegen wird im ersten Schritt der Anwendungskontext der Teleoperation untersucht und zudem der Entstehungsmechanismus der Unzulänglichkeiten geklärt (Forschungsfrage 1). Die Disengagement Reports weisen auf Funktionsgrenzen hin, beschreiben jedoch nicht deren Ursachen. Auf Basis der Disengagement Reports wird eine vertiefte Ursachenanalyse mittels eines Expertenworkshops durchgeführt. Es wird die Methode des Expertenworkshops gewählt, weil dabei Synergieeffekte [174, S. 15] aufgrund der unterschiedlichen, fachlichen Hintergründe der Teilnehmer zu neuen Erkenntnissen der Entstehung der Disengagements führen können. Aus dem Expertenworkshop werden nachfolgend Unzulänglichkeiten extrahiert. Die Unzulänglichkeiten enthalten die Szenarien, in denen die Unterstützung der AF durch die Teleoperation relevant ist. Daraus resultiert der Nutzungskontext der Teleoperation. Weil die Leitwarte und die Teleoperation im Kontext der Straßen-

fahrzeuge noch keine Anwendung gefunden haben, wird in dieser Arbeit der Nutzer nicht analysiert. Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wird eine theoriegeleitete Beanspruchungsanalyse durchgeführt. Diese erklärt vor allem mit Hilfe der Multiplen-Ressourcen-Theorie die Entstehung von Beanspruchungsspitzen während der Teleoperation mit der DS. Die gefundenen Ursachen für mentale Beanspruchung und der identifizierte Nutzungskontext motivieren die Entwicklung geeigneter und Szenario-spezifischer Steuerungsarten. Prototypisch wird hierfür die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung umgesetzt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen drei und vier schließt sich eine Probandenstudie an. Die Versuchspersonen nutzen die DS und die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung im Vergleich. Fokussiert werden Unterschiede in der Beanspruchung und der Bearbeitungsdauer. Mit einer Schulung werden sie für die Bedienung vorbereitet. Abschließend werden die Erkenntnisse im Kontext der theoriegeleiteten Beanspruchungsanalyse diskutiert und zukünftige Untersuchungsgegenstände identifiziert.

Das Anwendungsgebiet der Teleoperation ist in dieser Arbeit die Unterstützung einer automatisierten Fahrfunktion, die auf den innerstädtischen Bereich beschränkt ist und innerhalb dieses Bereichs eine Systemgrenze erreicht. Folglich sind alle Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit an diesem Anwendungsgebiet ausgerichtet. Die bis jetzt am häufigsten untersuchte und etablierte Steuerungsart der Teleoperation ist diesbezüglich die DS. Diese wird deswegen als Startpunkt der Untersuchungen gewählt. Weiter bezieht sich die Unterstützung der Teleoperation allein auf die Fahrfunktionen. Unterstützung durch Leitwartentätigkeiten wie der Kommunikation mit den Passagieren oder einer Routenplanung sind nicht Teil dieser Arbeit. Ebenso werden technische Defekte wie Sensorausfälle oder Systemausfälle in dieser Arbeit nicht als Unterstützungsursache betrachtet.

Analyse des Anwendungsgebiets

Die Vorgehensweise zur Analyse des Anwendungsgebiets der Teleoperation ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Es hat zum Ziel, relevante Szenarien für die Teleoperation zu identifizieren. Die Ergebnisse des Stands der Wissenschaft bezüglich der Auswertung der Disengagement Reports (Abschnitt 2.1.2) werden als Ausgangspunkt für die Konkretisierung der Unzulänglichkeiten von AF verwendet. Konkretisiert werden die Unzulänglichkeiten über einen Expertenworkshop. Die daraus extrahierten Szenarien werden abschließend nach der teleoperativen Lösbarkeit bewertet und gefiltert, damit nur die für die Teleoperation relevanten Szenarien übrigbleiben.

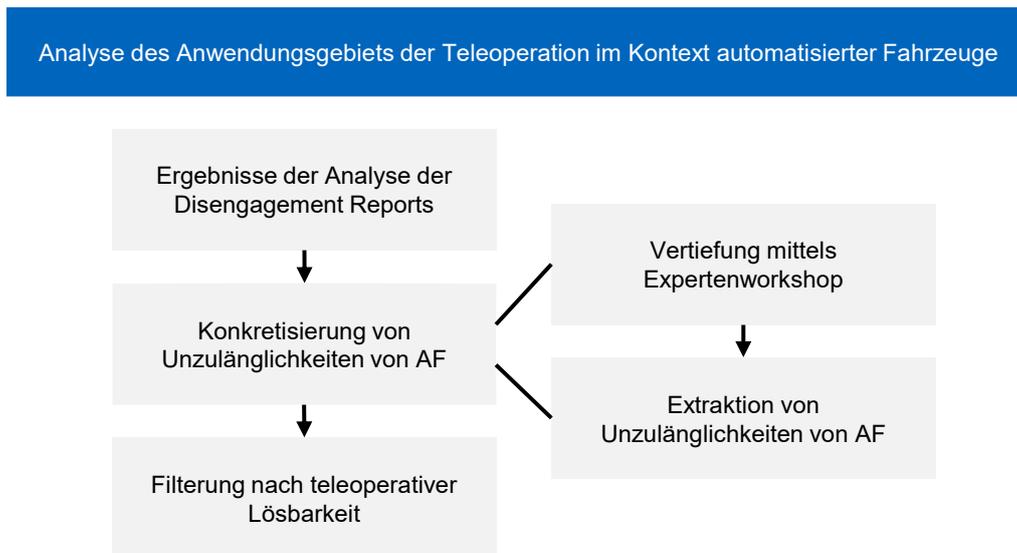


Abbildung 3.2: Vorgehen zur Analyse des Anwendungsgebiets der Teleoperation

Die Planung und Durchführung des Expertenworkshops folgt den zehn Schritten nach Lipp und Sachsenmeier [174, S. 20-25]. Zunächst beginnt der Expertenworkshop mit der Vorstellung der Teilnehmer und der Inputphase anhand eines zehnminütigen Vortrags bezüglich der Analyse der Disengagement Reports. Zudem wird die Thematik auf den Anwendungsfall eines innerstädtischen, automatisierten Fahrzeugs eingeschränkt und Begrifflichkeiten zum gemeinsamen Verständnis werden geklärt. Anschließend folgen die drei wesentlichen Tagesordnungspunkte: das Brainstorming zur Ideenfindung (Brainwriting-Pool), die thematische Vertiefung vorher generierter Ideen (World-Cafe) und abschließend ein Ranking der ausgearbeiteten Ideen durch die Teilnehmer.

Beim Brainstorming wird die Methode des Brainwriting-Pools angewendet (entnommen aus Flitter [175, S. 20] nach Schlicksupp [176]). Das Ziel dieses Schrittes ist es, möglichst umfangreich Unzulänglichkeiten von AF zu benennen. Deswegen wird das Brainwriting-Pool als eine mögliche Methode des Brainstormings verwendet [175, S. 19]. Es ist die Aufgabe der Teilnehmer, einen vorgegebenen Platzhalter mit möglichen Ideen zu füllen. Die Angabe lautet: „Für die heutige Fahrt reservierte ich mir ein Taxi, um entspannt bei dem für mich wichtigen Meeting anzukommen. Das Taxi kam pünktlich. Zudem fährt es autonom. Es sitzt kein Fahrer darin. Ich genieße gerade die innerstädtische Fahrt, als es in dem Moment stehen bleibt. Ich rätsele über die Ursache und vermute, dass ... zum Stillstand geführt hat.“ Die gepunktete Lücke wird von den Teilnehmern während des Brainwriting-Pool Verfahrens mit unterschiedlichen Ideen gefüllt. Anschließend sollen die möglichen Unzulänglichkeiten vertieft und deren Entstehungsmechanismus diskutiert werden. Um die Synergieeffekte der Teilnehmer unterschiedlichen, fachlichen Hintergrunds bestmöglich ausschöpfen zu können, wird für die Diskussion und Vertiefung die Methode des World-Cafes nach Brown [177] gewählt. Das World-Cafe bietet einen Rahmen, um kooperativen Dialog und aktives Engagement zu fördern [177]. Es werden zwei Gruppen gebildet, deren Mitglieder nach ca. 10-15 Minuten durch Mischen neu besetzt werden. Die Angabe, die die Teilnehmer erhalten, ist dem Anhang A zu entnehmen.

Die Analyse des Expertenworkshops erfolgt mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse zur induktiven Kategorienbildung nach Mayring [178, S. 69-90]. Die Inhaltsanalyse wird auf die Transkription des World-Cafés angewendet. Die Transkription findet nach den Richtlinien von

Bohnsack statt [179, S. 253-254]. Innerhalb der Inhaltsanalyse lautet das Selektionskriterium zur Kategorienbildung: „Eine Unzulänglichkeit liegt bei einer Kombination aus Szenario und Systemgrenze eines Moduls vor, die einen Stillstand herbeiführt und eine automatisierte Weiterfahrt nur bedingt oder nicht ermöglicht.“ Als Ergebnis der qualitativen Inhaltsanalyse liegen Unzulänglichkeiten und Szenarien automatisierter Fahrzeuge vor, im Besonderen Stillstände aufgrund von Funktionsgrenzen, die nicht klassischen Fehlern oder Ausfällen von Systemen entsprechen.

Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups

In Abbildung 3.3 ist die Vorgehensweise zur Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups dargestellt. Das Ziel dieses Vorgehens ist die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, die nach der Entstehung der Überbeanspruchung bei der Teleoperation mit der DS fragt. Dazu wird zunächst die konventionelle Fahrzeugführung auf ihre Teilaufgaben und der kognitiven Ressourcennutzung hin analysiert. Diese beansprucht die Fahrer im Regelfall nicht zu stark und kann als Vergleichsniveau dienen. Auf die Teilaufgaben der konventionellen Fahrzeugführungsaufgaben werden die Veränderungen durch das Teleoperationssetup und die DS angewendet. Nachteilige Veränderungen werden anhand dieses Vorgehens erklärbar und sind logisch begründbar.

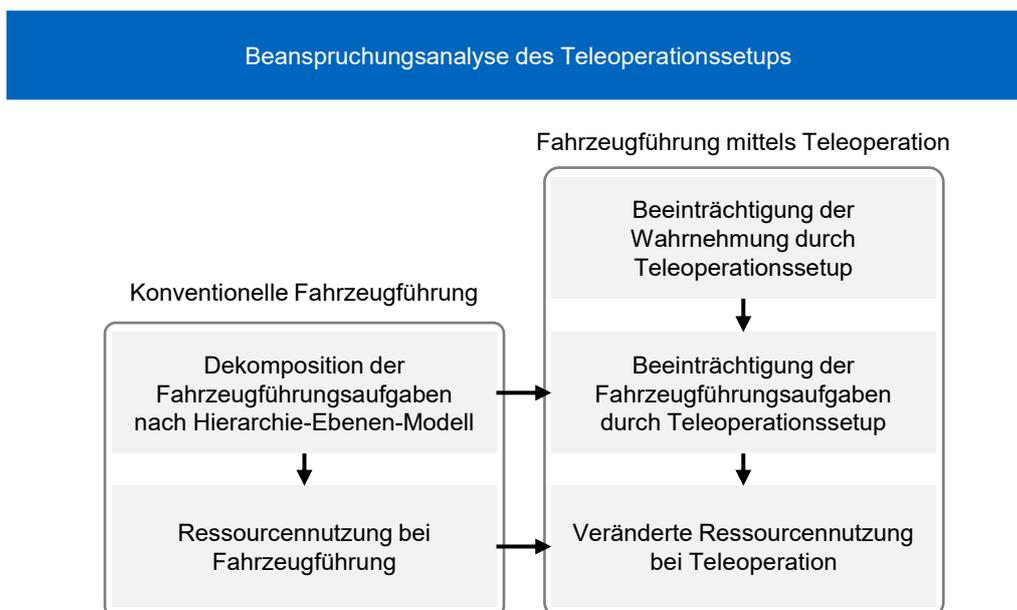


Abbildung 3.3: Übersicht über die Vorgehensweise zur Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups

Die konventionelle Fahrzeugführung wird in ihre Teilaufgaben untergliedert (Abbildung 3.3). Ausgehend von dem Hierarchie-Ebenen-Modell nach Bubb [161, S. 36] sind die primären Fahraufgaben auf den Ebenen der Führung und Stabilisierung von Interesse. Die für die Erfüllung der Teilaufgaben benötigten Ressourcen werden anschließend abgeleitet und argumentativ durch den Autor bewertet. Das daraus entstehende Zwischenergebnis zeigt die Verteilung der Ressourcennutzung während der konventionellen Fahrzeugführung.

Anschließend werden die Auswirkungen durch das Teleoperationssetup betrachtet (Abbildung 3.3, rechte Spalte). Dazu werden die Auswirkungen auf die menschliche Wahrnehmung durch

das Teleoperationssetup vorgestellt. Diese haben Beeinträchtigungen der Fahrzeugführungsaufgabe zur Folge, die durch einen erhöhten Ressourcenbedarf kompensiert werden können. Zusammenfassend erklären so Aspekte des Teleoperationssetups die erhöhte Beanspruchung bei der DS der Teleoperation im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung.

Konzeption und Umsetzung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Analyse des Nutzungskontextes und der Ursachenanalyse der mentalen Beanspruchung wird entsprechend des Vorgehens nach Abbildung 3.4 die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung realisiert. Sie wird beispielhaft umgesetzt, um die vorher angestellten, theoretischen Zusammenhänge bezüglich der Reduktion der mentalen Beanspruchung nachfolgend in einer Studie untersuchen zu können. Die Konzeption und Umsetzung des Autors ist bereits veröffentlicht [180].

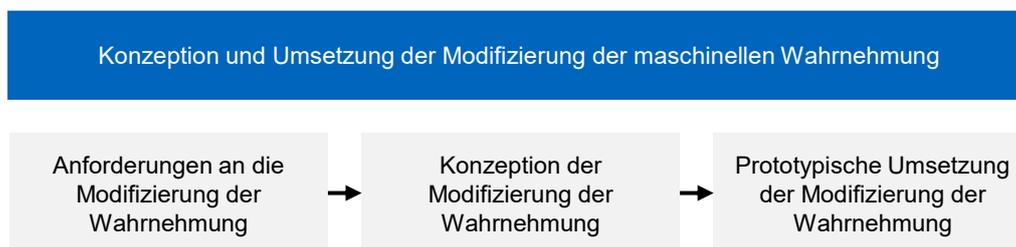


Abbildung 3.4: Vorgehen zur prototypischen Umsetzung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

In Abbildung 3.5 ist das Vorgehen zur Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung dargestellt. Die Vorbereitungen für die Studie umfassen die Schulung der Versuchspersonen und die Operationalisierung der mentalen Beanspruchung.

Das Teleoperationssystem ist ein Expertensystem. Der Validität der Ergebnisse der Studie ist es deswegen zuträglich, wenn das System von adäquat unterrichteten Versuchspersonen bewertet wird. Dafür wird eine Schulung erstellt, deren zentrales Element die Lernziele entsprechend dem Leitfaden nach Kennedy [181] sind. Es erfolgt die Definition von Lernzielen und deren Einordnung in die Taxonomietabelle nach Anderson [182], die eine Revision von Blooms Taxonomietabelle [183] ist. Die Taxonomie hat laut Krathwohl [184] die Absicht, dass verschiedene Personen sich mittels der gleichen Ausdrucksweise über die Lernziele eines Unterrichts verständlich austauschen können. Zudem ist es ein Mittel, um kontinuierlich die Lernziele, die Aktivitäten und die Beurteilung auf deren Stimmigkeit abgleichen zu können. Anschließend wird ein passendes Lehrkonzept nach Romiszowski [185] abgeleitet. Alle an der Hauptstudie teilnehmenden Versuchspersonen durchlaufen diese Schulung.

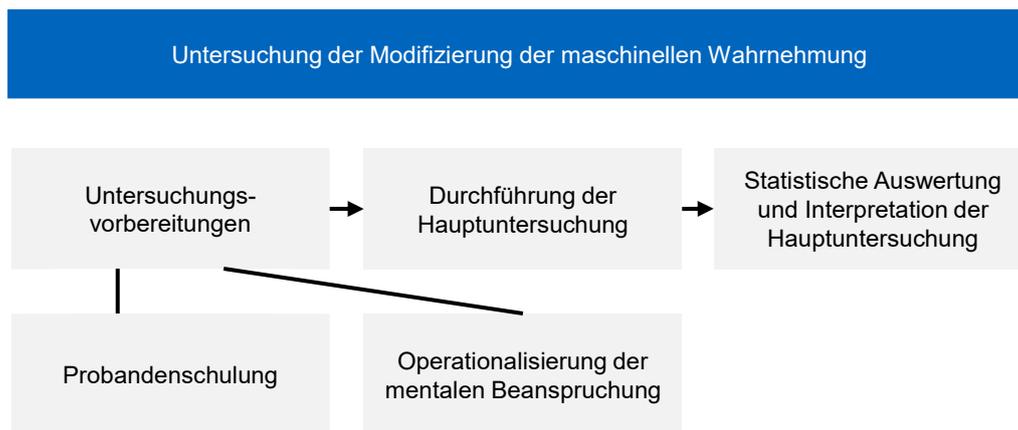


Abbildung 3.5: Vorgehen zur Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung in einer Probandenstudie

Die Hypothesen der Hauptuntersuchung werden aus dem Ziel abgeleitet, eine Steuerungsart mit geringerer mentaler Beanspruchung zu entwickeln. Folglich ist die mentale Beanspruchung zu operationalisieren. Die Vorbereitung der Operationalisierung der mentalen Beanspruchung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die Messarten diskutiert und eine Auswahl getroffen. Anschließend wird die Verarbeitung der physiologischen Messungen erläutert, die sich im Wesentlichen in die Datenvorbereitung, die Definition, Identifikation und den Umgang mit Artefakten und die Extraktion der Messgrößen untergliedert. Die Datenvorbereitung der HLW-Daten erfordert eine Unterteilung in phasische und tonische Komponenten, weil die jeweiligen Komponenten zur Berechnung einiger Kenngrößen notwendig sind. Die Artefakte müssen definiert werden, weil für das verwendete Setup keine veröffentlichten Regeln zur Identifizierung von Artefakten vorliegen. Dazu werden bestehende Regeln aus anderen Setups recherchiert und auf das vorliegende Setup übertragen.

Zudem wird eine Vorstudie durchgeführt, um die Erhebung der mentalen Beanspruchung mittels physiologischer Beanspruchung im Kontext des Teleoperierten Fahrens zu testen. Zum einen werden die Soft- und Hardware auf ihre Tauglichkeit und Robustheit geprüft, zum anderen werden die physiologischen Messgrößen auf ihre Sensitivität bezüglich der mentalen Beanspruchung untersucht.

Die Vorstudie und die Hauptstudie werden als Simulatorstudie im gleichen Simulator durchgeführt. Eine Simulatorstudie bietet die Vorteile, dass die Versuchspersonen das System in einer reproduzierbaren Umgebung untersuchen und sowohl andere Verkehrsteilnehmer als auch sich selbst dabei nicht gefährden. Bei dem vorliegenden Untersuchungsgegenstand ist die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern notwendig. Zudem ist nicht eine absolute Validität, sondern eine relative Validität von Interesse, für deren Ermittlung ein Simulator üblicherweise geeignet ist [186, S. 415].

Die Hauptstudie wird als Studie mit Messwiederholung durchgeführt, die den Vorteil einer höheren statistischen Teststärke bei gleicher Größe der Stichprobe bietet. Die Versuchspersonen nutzen und bewerten die DS und die MMW randomisiert jeweils an den gleichen Szenarien. Die mentale Beanspruchung wird mittels einer multivariaten Varianzanalyse (MANOVA) mit Messwiederholung untersucht, weil die mentale Beanspruchung durch mehrere abhängige Variablen repräsentiert wird. Multivariat bezeichnet die gleichzeitige Untersuchung mehrerer abhängiger

Variablen. Es wird versucht, deren Veränderung aufgrund der Variation einer unabhängigen Variable herbeizuführen. Nach Pituch und Stevens [187, S. 142] sprechen zwei Gründe für die Wahl einer MANOVA. (1) Eine Entwicklung sollte die Versuchspersonen auf mehr als nur eine Art beeinflussen. (2) Die Auswertung mehrerer abhängiger Variablen ergibt ein umfassenderes Bild der Wirkung der Entwicklung.

Die Situationslösedauer wird mittels eines abhängigen t-Tests untersucht. Abschließend werden die Auswertungen im Gesamtkontext diskutiert. Die Datenvorbereitung findet in Python [188] statt, die statistische Auswertung in R [189].

4 Analyse des Anwendungsgebiets der Teleoperation

Dieses Kapitel widmet sich der ersten Forschungsfrage. Zur Beantwortung dieser werden im Folgenden die Szenarien vorgestellt, die entsprechend der Erkenntnisse aus dem Expertenworkshop für eine teleoperierte Situationslösung in Frage kommen und relevant sind.

4.1 Herausfordernde Szenarien für automatisierte Fahrzeuge

In diesem Abschnitt werden die Szenarien näher beleuchtet, die für AF herausfordernd sind. Sie sind das Ergebnis des Expertenworkshops und der sich anschließenden qualitativen Inhaltsanalyse, deren Vorgehensweisen in Kapitel 3 beschrieben sind. Die Szenarien stellen mögliche Szenarien für das Teleoperierte Fahren dar.

Bei den Teilnehmern des Expertenworkshops handelt es sich um sechs erfahrene Doktoranden. Sie forschen auf dem Gebiet des automatisierten Fahrens in unterschiedlichen Bereichen, die sich von der Regelung über die Wahrnehmung bis hin zur Absicherung erstrecken.

Die Ergebnisse der Expertenworkshops werden nach der Transkription und Zusammenführung der überlappenden Szenarien in den nachfolgenden Abschnitten detailliert. Es handelt sich um das ungewöhnliche Objekt, das blockierende Objekt, den Einsatzfahrzeug-Regelbruch, das Deadlock-Szenario, den Lokalisierungsfehler, die Änderungen im Bewegungsmodell und die vorsätzlichen Angriffe auf die Sensoren und die Planung.

4.1.1 Ungewöhnliches Objekt

Das ungewöhnliche Objekt beschreibt die Unzulänglichkeit, dass Schwierigkeiten in der Wahrnehmung zum Stillstand der Fahrzeugautomation führen können, obwohl eine Weiterfahrt möglich wäre.

Ein ungewöhnliches Objekt meint ein Objekt, das aus der Sicht der Fahrzeugautomation ungewöhnlich ist. Ist ein Objekt für die Objekterkennung ungewöhnlich, kann das zur Folge haben, dass das Objekt, falls es detektiert wird, nicht der passenden Kategorie zugeordnet wird. Folglich kann die Intention der Detektion nicht oder nicht richtig von der Fahrzeugführung verstanden werden. Abhängig vom verwendeten Algorithmus der Objekterkennung können folgende Arten auftreten.

Zum einen können Objekte vorliegen, die nicht klassifiziert werden können, weil die Objekterkennung die vorliegende Kategorie nicht unterstützt. Beispiele können Plastiktüten, Äste oder verlorene Ladung sein. Diese Objekte können zum Teil überfahrbar sein.

Zum anderen gliedern sich in diese Kategorie Objekte ein, die einer falschen Klasse zugewiesen werden. Beispiele sind Radfahrer, die als Motorradfahrer interpretiert werden, oder eine Person mit Rollator, die als Fahrradfahrer interpretiert wird. Das hat zur Folge, dass dem Objekt für die

Prädiktion ein unpassendes Bewegungsmodell zugeordnet wird und der befahrbare Korridor des automatisierten Fahrzeugs für eine Weiterfahrt eventuell zu stark eingeschränkt wird.

Darüber hinaus kann es sich um Objekte handeln, die an sich erkannt werden, deren Intention aber nicht verstanden wird. Ein Beispiel hierfür ist ein Kreuzungsverkehrsleitender Polizist. Dieser kann durchaus als Person interpretiert werden, ob jedoch seine Gesten von der Fahrzeugautomation korrekt interpretiert werden, ist fraglich.

4.1.2 Blockierendes Objekt

Das blockierende Objekt meint Situationen, in denen Einschränkungen durch den Betriebsmodus keine Lösung zulassen. Die Einschränkungen können Randbedingungen aus Sichtweite, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Sicherheitsabstände oder sonstigen Regeln sein. Ein Beispiel dafür ist ein dauerhaftes oder geparktes Hindernis, das die Sicht verdeckt. Eine Vorbeifahrt würde einem Vorbeitasten entsprechen und ist mit einem Anstieg des Unfallrisikos unter anderem aufgrund von beschränkten Sensorsichtweiten verbunden. Weitere Szenarien können Engstellen darstellen, in denen Sicherheitsabstände das Weiterkommen verhindern. Als mögliche Ursache hierfür kann auch die Tatsache verantwortlich sein, dass die einhüllenden Boxen (Bounding Boxes) meist etwas größer sind als das reale Objekt.

4.1.3 Einsatzfahrzeug-Regelbruch

Beim Einsatzfahrzeug-Regelbruch-Szenario handelt es sich nur um einen scheinbaren Bruch von Verkehrsregeln. Die Experten nannten als Beispiele das Befahren eines Bordsteins oder das langsame Überfahren einer Haltelinie während der roten Ampelphase, um einem Einsatzfahrzeug den Weg frei zu machen. Ausgelöst werden kann dieses Verhalten durch ein kurzzeitig neues Missionsziel, wodurch dem Einsatzfahrzeug Raum gegeben wird. Diese Verhaltensweisen sind kein tatsächlicher Regelbruch, sondern mit der deutschen Straßenverkehrsordnung vereinbar [190, S. 22]. Vielmehr handelt es sich um einen Abwägungsprozess innerhalb des Regelwerks. Das umfangreiche Regelwerk wird möglicherweise nicht vollständig im automatisierten Fahrzeug umgesetzt sein, weil sich mit Zunahme der Sonderfälle ein exaktes Verhalten nur erschwert vorhersagen lässt. Das kann zu einer unnötigen Ausweglosigkeit führen, weil programmierte Regeln verletzt werden müssten, aber nicht verletzt werden. Gerade im zeitkritischen Zusammenhang mit Einsatzfahrzeugen sollte diese Ausweglosigkeit vermieden werden.

4.1.4 Deadlock Szenario

Deadlock-Szenarien meinen Szenarien, in denen es aufgrund von falscher oder fehlender Kommunikation zum Erliegen des Verkehrsflusses oder der Fortbewegung des Egofahrzeugs kommt. Als Beispiele wurden von den Experten Kreuzungs- oder Einfädelsituationen genannt. In entsprechenden Pattsituationen analysiert Imbsweiler [191] das Kooperationsverhalten von Realfahrern und leitet situationsspezifische Gestaltungshinweise für automatisierte Fahrzeug ab.

4.1.5 Lokalisierungsfehler

Die Kategorie Lokalisierungsfehler meint Situationen, bei denen die Positionsangabe des verwendeten Algorithmus für die darauf basierende Fahrzeugregelung nicht korrekt ist. Es gibt unterschiedliche Lokalisierungsverfahren, bei denen sich noch keine als allgemeingültig und einzig passend etabliert hat [192–194]. Eine Vielzahl der Systeme stützt sich unter anderem auf hochgenaue Karten. Eine veränderte Umgebung (Jahreszeitenunterschied, geänderte Verkehrsführung, Baustelle, Dunkelheit) kann problematisch für die Merkmalsüberprüfung werden. Diese oder ähnliche Unzulänglichkeiten können fast unabhängig von einer bestimmten Szenariokonstellation auftreten. Deswegen werden an dieser Stelle keine expliziten Szenarien genannt.

4.1.6 Änderungen im Bewegungsmodell

Zudem wurde die Problematik genannt, dass einige, in Fahrzeugen verwendete Regelungsalgorithmen nicht die Fähigkeiten besitzen, sich an verändernde Umweltbedingungen anzupassen. Als Ursachen sind starker Wind, glatte Straßen oder ein Reifenschaden genannt worden. Besonders herausfordernd ist hierbei die prädiktive Reibwert- und Fahrdynamikschätzung [195, 196].

4.1.7 Vorsätzliche Angriffe auf die Sensoren und die Planung

Weiter wurden vorsätzliche Angriffe auf automatisierte Fahrzeuge genannt. Zum Beispiel auf die Sensoren oder auf die Planung. Bei den Sensoren können den Lidar- oder Radarsensoren über externe Quellen Signale aufgeprägt werden. Bei der videobasierten Umgebungswahrnehmung genügen plakatierte Oberflächen, um das Ergebnis zu verfälschen (überklebte Geschwindigkeitsbegrenzungen, Aufdrucke auf Lkw).

4.2 Mittels Teleoperation lösbare Szenarien

Für die obigen Szenarien benötigen automatisierte Fahrzeuge Lösungen. Sofern die Szenarien nicht zeitkritisch sind und sie eine Übernahme aus dem Stillstand heraus ermöglichen, kann die Teleoperation eine anwendbare Lösung sein. Die DS deckt das breite Feld dieser Szenarien ab, weil ihr Handlungsspielraum konzeptuell dem eines konventionellen Fahrers entspricht. Zudem stellt die DS die geringsten Anforderungen an die Automatisierung im Fahrzeug selbst.

Übernahmen während der Fahrt sind zwar denkbar, jedoch sind dem Autor zum Zeitpunkt des Verfassens keine Untersuchungen hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit und der menschlichen Kontrollier- und Bedienbarkeit im Bereich der Teleoperation bekannt. Als Übernahme wird der Übergang der Fahrzeugführung von der Automation auf den Operator und umgekehrt verstanden. Zu der Herausforderung der stark variablen Übernahmezeiten, die bei Eriks-son [197, S. 701] zwischen 1,9 und 25,7 Sekunden für Übernahmeaufforderungen automatisierter Fahrzeuge liegen, kämen die Herausforderungen der dauerhaften Verfügbarkeit eines Operators und der technischen Realisierung eines raschen Verbindungsaufbaus hinzu.

Die Teleoperation kann für alle obig genannten Unzulänglichkeiten eine realistische Lösung sein, mit entsprechender Einschränkung der Übernahmen jedoch nicht beim Einsatzfahrzeug-Regelbruch-Szenario. Sie kann zwar die Dauer einer Blockade durch ein AF reduzieren, jedoch ist es

möglich, dass sie den zeitlichen Anforderungen in diesen Szenarien aufgrund der ungewissen Übernahmezeiten aus der Leitwarte nicht gerecht wird. Aufgrund des umfassenden Handlungsspielraums der DS wird diese im nächsten Schritt bezüglich der mentalen Beanspruchung analysiert.

5 Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups

Die DS deckt, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, aufgrund ihrer allgemeinen Anwendbarkeit das größte Spektrum an zu lösenden Szenarien ab. Sie kann Operatoren jedoch stark beanspruchen. Einige Fälle sind dazu in Abschnitt 2.4.4 beschrieben. Anhand der Multiplen-Ressourcen-Theorie wird in diesem Abschnitt erläutert, wie es zu dieser Überbeanspruchung kommen kann. Dazu werden das konventionelle Steuern eines Fahrzeugs und die DS der Teleoperation miteinander verglichen. Das Ergebnis ist die theoretische Herleitung des Auftretens der mentalen Beanspruchungsunterschiede zwischen den beiden Bereichen.

5.1 Ziel und Aufgaben der Fahrzeugführung

In diesem Abschnitt werden die notwendigen Teilaufgaben zum Führen eines Fahrzeugs erläutert. Diese sind den Teilmodulen der in Abschnitt 2.1.1 aufgeführten Sense-Plan-Act-Architektur entnommen und an die Hierarchie der Fahraufgabe nach Bubb [161, S. 36] angelehnt. Von besonderem Interesse sind hierbei innerhalb der primären Fahraufgabe die Teilaufgaben zur Führung und Stabilisierung. Nachfolgend werden die Teilaufgaben aufgeführt, auf die in den sich anschließenden Abschnitten Bezug genommen wird.

Das Ziel der Fahrzeugführung ist die Fortbewegung von einem Start- zu einem Zielort. Das Fahrverhalten wird wesentlich von den Randbedingungen der Fahrsicherheit und des Zeitbedarfs beeinflusst, die zum Teil zueinander in einem Zielkonflikt stehen. Eine Reduktion der benötigten Fahrzeit kann die Fahrsicherheit reduzieren. Die Erhaltung der Fahrsicherheit lässt sich in die Vermeidung der eigenen Gefährdung und der Gefährdung anderer sowie in die Vermeidung materiellen Schadens aufgliedern. Für diese Aspekte sind einige kognitive Prozesse notwendig.

Für die Vermeidung der Gefährdung anderer ist es notwendig, dass auf der Führungsebene die relevanten Verkehrsteilnehmer wahrgenommen werden, ihre Abmessungen und Position begriffen werden und deren Intentionen erkannt werden. Zudem muss ihr Verhalten antizipiert werden und selbst eine passende Interaktion (Solltrajektorie) geplant werden. Die Umsetzung dieser Interaktion setzt auf der Stabilisierungsebene voraus, dass der Fahrer die Abmessungen und die Fahrdynamik des eigenen Fahrzeugs kennt und die eigene Fahrzeugbewegung korrekt umsetzt. Ähnlich verhält es sich mit der Vermeidung der eigenen Gefährdung und dem Vermeiden materiellen Schadens. Die relevanten Objekte müssen wahrgenommen werden, deren Abmessungen und Position erfasst werden und das eigene Verhalten muss angepasst werden.

5.2 Zuordnung der Fahrzeugführungsaufgaben zu Wickens Ressourcen

Die Ressourcen, die für die Erfüllung der in Abschnitt 5.1 genannten Teilaufgaben notwendig sind, können den Ressourcendimensionen des Multiplen-Ressourcen-Modells nach Wickens

[90, S. 163, 198, S. 612] zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird im Folgenden erläutert und anhand von Ressourcennutzungsgraden in Tabelle 5.1 mit vier Stufen innerhalb von 0 bis 1 dargestellt. Die Ressourcennutzungsgrade werden nach Wickens Vorgehen [90, S. 168] subjektiv durch den Autor bestimmt. Es sei angemerkt, dass auf die vierte Dimension der Multiplen-Ressourcen-Theorie (Verarbeitungscode, räumlich oder verbal) verzichtet wird, weil die hier aufgeführten Teilaufgaben ausschließlich dem räumlichen Verarbeitungscode zugeordnet werden. Die Informationsverarbeitungsprozessstufe Perzeption-Kognition wird nur für die sich anschließende Erklärung in Perzeption und Kognition aufgetrennt. Deswegen ist ein simultaner Ressourcenbedarf aus der Perzeption und Kognition kritisch zu betrachten, weil sie nach Wickens auf dieselbe mentale Ressource zugreifen. Außerdem wird der Perzeptiven Modalität die Dimension vestibulär-haptisch hinzugefügt, weil sie nach Tomaske bei der Fahrzeugführung entscheidend zum Beschleunigungsempfinden beiträgt [199], den ursprünglichen Dimensionen der Multiplen-Ressourcen-Theorie aber bisher nicht zugeordnet werden kann.

Die erste Zeile der Tabelle 5.1 „Konventionelles Fahren“ beinhaltet den errechneten Mittelwert der darunter angeordneten Ressourcennutzungsgrade, deren Wertebestimmung im Nachfolgenden durch den Autor argumentativ erörtert wird. Zusammenfassend lässt sich der Ressourcenbedarf während der konventionellen Fahrzeugführung als verteilt über die einzelnen Ausprägungen innerhalb der Ressourcendimensionen „Stufe“, „Perzeptive Modalität“ und „Visueller Kanal“ beschreiben. Im Regelfall ist die Fahrzeugführung eine Aufgabe, die unsere Aufmerksamkeit benötigt, uns aber nicht überfordert.

Tabelle 5.1: Beispielhafte Ressourcennutzung einer konventionellen Fahrzeugführung. Die erste Zeile „Konventionelles Fahren“ beinhaltet den errechneten Mittelwert der darunter angeordneten Werte. Die Werte erstrecken sich über vier Stufen von 0 (nicht genutzt) bis 1 (vollständig genutzt) und werden entsprechend dem Vorgehen nach Wickens [90, S. 168] subjektiv durch den Autor bestimmt.

Teilaufgabe	Stufe			Perzeptive Modalität				Visueller Kanal	
	Perzeption	Kognition	Response	visuell	auditiv	vestibular haptisch	fokal	peripher	
Konventionelles Fahren	0,38	0,19	0,10	0,33	0,14	0,14	0,33	0,38	
Wahrnehmung Verkehrsteilnehmer	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	
Einschätzung Abmessungen Verkehrsteilnehmer	0,67	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	
Bewegungsantizipation	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	
Abmessungen Egofahrzeug	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	
Fahrdynamik Egofahrzeug	0,67	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	
Planung Manöver + Trajektorie	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	
Umsetzung Trajektorie	0,00	0,00	0,67	0,33	0,33	0,67	0,33	0,67	

Das Wahrnehmen der Verkehrsteilnehmer und der relevanten Objekte ist eine perzeptive Aktivität, die zum Großteil visuell oder auditiv stattfindet. Sofern sich die Verkehrsteilnehmer in unserem Gesichtsfeld bewegen, ziehen sie automatisch aufgrund ihrer Bewegung unsere Aufmerksamkeit auf sich [154, S. 61]. Häufig werden wir auch durch Geräusche auf Ereignisse oder Objekte aufmerksam [154, S. 238]. Folglich benötigt das Wahrnehmen der Verkehrsteilnehmer und der relevanten Objekte akustische Ressourcen und kann sowohl den peripheren wie auch den fokalen visuellen Kanal verwenden.

Das Erfassen der Abmessungen und Positionen anderer Verkehrsteilnehmer oder Objekte ist eine größtenteils perzeptive, visuelle Aktivität und zu einem kleineren Teil eine kognitive Aktivität. Ein Fahrer erfasst die Abmessungen über die Tiefenwahrnehmung [154, S. 62] und eine unbewusste Inferenz, die aus den uns bekannten Objekten das wahrscheinlichste Objekt annimmt und dadurch Rückschlüsse auf die Abmessungen zieht [154, S. 125]. Innerhalb des visuellen Kanals können die fokale wie auch die periphere, visuelle Verarbeitung verwendet werden.

Das Erkennen der Intention und das Antizipieren der Bewegung sind perzeptive und kognitive Aktivitäten. Bekannte oder offensichtliche Intentionen können direkt über das Langzeitgedächtnis abgerufen werden und bedürfen deswegen geringe Aufmerksamkeitsressourcen. Bei allen weiteren Intentionen bedarf es der räumlichen Kognition und der fortlaufenden auditiven oder visuellen Perzeption. Hierfür können sowohl die fokale wie auch die periphere visuelle Verarbeitung eingesetzt werden.

Das Wissen über die Abmessungen des eigenen Fahrzeugs ist bei den meisten Fahrern aufgrund von Erfahrung in das Langzeitgedächtnis übergegangen. Weiteres Wissen kann mittels visueller Perzeption (fokal und peripher) und räumlicher Kognition erzeugt werden. Eine Aufteilung der Ressourcennutzung ist zwischen fokaler und peripherer visueller Perzeption möglich.

Die Wahrnehmung der eigenen Fahrdynamik ordnet sich innerhalb der Perzeption des Informationsverarbeitungsprozesses ein. Es haben bereits einige Untersuchungen zu der Frage, auf welche Weise die Fahrdynamik wahrgenommen wird, stattgefunden [78, S. 82]. Der Mensch greift gemäß Tabelle 5.2 auf unterschiedliche Sinneskanäle zurück. Dementsprechend verteilt sich der Ressourcenbedarf auf die visuelle, auditive und vestibulär-haptische Ausprägung der perzeptiven Modalität. Innerhalb der visuellen Wahrnehmung wird die fokale und periphere Wahrnehmung genutzt.

Tabelle 5.2: Zusammenhang zwischen den Fahrinformationen und den menschlichen Sinneskanälen (aus Schweigert [160, S. 8] nach Tomaske [199])

Information	Visuell	Vestibulär	haptisch	akustisch
Spurabweichung	X			
Fahrgeschwindigkeit	X			X
Längs- und Querbeschleunigung		X	X	
Giergeschwindigkeit	X			
Gierbeschleunigung		X		

Die Planung der Fahrzeugbewegung ist ein räumlicher, kognitiver Prozess, der je nach Fahrerfahrung in einen automatisierten Prozess überführt werden kann. Als automatisierter Prozess unterliegt die Ausführung dieses Prozesses nur der Güte der Signale [88, S. 192]. Es werden keine Aufmerksamkeitsressourcen benötigt. Sofern noch nicht erlernt, sind kognitive Ressourcen zur Planung der Fahrzeugbewegung notwendig.

Die Umsetzung der korrekten Fahrzeugbewegung ist ein fortlaufender Prozess, in dem die Handlung ausgewählt und umgesetzt wird. Er bindet nach der Multiplen-Ressourcen-Theorie ausschließlich Ressourcen, die im Informationsverarbeitungsprozess der Auswahl und Ausführung der Reaktion zuzuordnen sind und getrennt von den Ressourcen der Perzeption und

Kognition sind. Innerhalb dieser Informationsverarbeitungsstufe nutzt diese Tätigkeit den manuellen, räumlichen Verarbeitungscode.

5.3 Veränderungen der menschlichen Wahrnehmung durch die Teleoperation

In diesem Abschnitt werden die nachteiligen Veränderungen der Wahrnehmung durch das Teleoperationssetup aufgeführt. In der nachfolgenden Beschreibung sind die Zusammenhänge entsprechend des aktuellen Teleoperationssetups dargestellt. Es werden die Auswirkungen auf die Wahrnehmungsaspekte gezeigt, die in Abschnitt 2.5 vorgestellt sind, und Gründe dafür angeführt. Im Wesentlichen werden durch die Teleoperation einige Wahrnehmungsaspekte beeinträchtigt, wobei sich der Grad der Beeinträchtigung unterscheiden kann. Die Beeinträchtigungen sind in der Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Übersicht der wesentlichen, nachteiligen Veränderungen von Wahrnehmungsaspekten aufgrund von Teleoperation

Wahrnehmungsaspekt	Tendenz
Dimensionsklarheit	↓
Beschleunigungsempfinden	↓
Tiefenwahrnehmung	↓
Objektbewegung	↓
Eigenbewegung	↓
Bildsegmentierung/Objektwahrnehmung	↓

Die Dimensionsklarheit ist bei der Teleoperation stark eingeschränkt. Gemeint ist damit die Fähigkeit, die Dimensionen des eigenen Körpers oder des gesteuerten Roboters korrekt in Relation zur Umgebung setzen zu können [200, S. 261]. Im Bereich der Teleoperation von Straßenfahrzeugen ist diese Kompetenz grundlegend, um die eigenen Fahrzeugabmessungen vor allem in räumlich engen Szenarien relativ zu umliegenden Verkehrsteilnehmern einschätzen zu können. Die Dimensionsklarheit ist aufgrund mehrerer Aspekte gestört. Zum einen handelt es sich bei dem gesteuerten Roboter nicht um den eigenen Körper, wodurch propriozeptive Empfindungen und die haptische Wahrnehmung wegfallen. Zum anderen findet keine Tiefenwahrnehmung bezüglich der Abmessungen des ferngesteuerten Roboters statt. Eine binokulare Tiefenwahrnehmung ist aufgrund des Setups mit einer Kamera pro Sichtbereich nicht möglich. Für die monokulare Tiefenwahrnehmung ist eine Bewegungsparallaxe notwendig. Die Bewegungsparallaxe setzt eine Translation des Auges relativ zu den Objekten voraus, deren räumliche Wahrnehmung von Interesse ist. Weil die Kameras am ferngesteuerten Roboter fest angebracht sind, kann keine Translation zwischen Kamera und Roboter stattfinden. Für den Operator ist es zwangsläufig schwierig, die Dimensionen des ferngesteuerten Fahrzeugs einzuschätzen.

Das Beschleunigungsempfinden, das Lageempfinden und das Entfernungsempfinden sind bei der Teleoperation deutlich beeinträchtigt, weil sie wesentlich auf den Empfindungen des in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Vestibularapparats beruhen. Der Vestibularapparat wird bei der

Teleoperation in einem statischen Operatorarbeitsplatz jedoch nicht mit den entsprechenden Beschleunigungen des teleoperierten Fahrzeugs bedient. Deswegen muss von einer deutlichen Minderung des Empfindens von Entfernung und Lage und einer deutlichen Minderung des Beschleunigungsempfindens ausgegangen werden. Darkner [201, S. 9] stellt die Minderung des Empfindens von Lage und Entfernung in einer Untersuchung insofern fest, dass die Orientierung und Lokalisation bei einer Erkundungsmission alleinig mittels Videos nur mit enormer Konzentration möglich ist. Tomaskes Ergebnisse [199] bestätigen für das Autofahren die wesentliche Wahrnehmung der Beschleunigungen über den Vestibularapparat. Zudem wird bei der Teleoperation die Haptik nicht gleichermaßen wie im Fahrzeug bedient. Diese trägt laut Tomaske [199] ebenfalls zum Beschleunigungsempfinden bei.

Die Tiefenwahrnehmung bezüglich anderer Objekte ist verschlechtert, aber vorhanden. Die Tiefe wird beim aktuellen Teleoperationssetup monokular anhand der in Abschnitt 2.5.4 erläuterten Bewegungsparallaxe wahrgenommen. Sie ist jedoch nur eingeschränkt vorhanden, weil der Operator die Bewegungsparallaxe nicht mit Hilfe von Eigenbewegung beeinflussen kann. Kopfbewegungen des Operators vor dem Bildschirm ändern nicht die Darstellungsperspektive des Videos. Erst die Fahrzeugbewegung und Bewegungen anderer Objekte erzeugen die Tiefenwahrnehmung. Aufgrund der Verzerrungen abhängig vom Linsentyp kann jedoch nicht ohne Kompensation ein korrekter Umgebungseindruck erlangt werden. Zudem steht die Stereopsis dem Operator aktuell nicht zur Verfügung.

Die Wahrnehmung der Objektbewegungen ist ebenfalls verschlechtert. In Bezug auf die korrekte (absolute) Einschätzung von Objektbewegungen sind die Eigenbewegung des Kopfes und die Augenfolgebewegungen während des Betrachtens des Videos anders als wenn der Bewegung in der Realität gefolgt werden würde. Das bedeutet, dass der inhärente Filtermechanismus der Kopf- und Augenbewegung nicht adäquat genutzt werden kann. Die Bewegungen anderer Objekte werden an sich festgestellt. Die empfundenen Geschwindigkeiten der Objekte werden aber intuitiv nicht korrekt eingeschätzt. Eine Adaption ist dafür notwendig.

Die Eigenbewegung wird wahrgenommen, weil retinale Flussbilder vorhanden sind und diese die Eigenbewegungswahrnehmung, wie in Abschnitt 2.5.3 beschrieben, maßgeblich beeinflussen können. Jedoch bleibt die korrekte Schätzung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit schwierig [78, S. 98], weil die Empfindungen des Vestibularapparats und des Gehörs ausbleiben und die aus den Videos erzeugten retinalen Flussfelder nicht denen der Realität entsprechen müssen. Verantwortlich dafür sind unter anderem verschiedene Positionierungen der Kameras. Niedrige Anbringungshöhen sorgen für eine deutlich schneller empfundene Eigengeschwindigkeit, weil der Boden aufgrund der geringen Distanz zur Kamera schnell an ihr vorbeifließt und einen großen retinalen Fluss erzeugt.

Die Bildsegmentierung, dessen Resultat die Unterscheidung verschiedener Objekte ist, ist bei der Teleoperation wie auch bei dem Betrachten von Videos nativ vorhanden. Sie ist jedoch teilweise eingeschränkt. Sie fußt auf der hohen Sensitivität gegenüber Geschwindigkeitsgrenzen, wodurch Objekte aufgrund von unterschiedlichen Geschwindigkeiten wahrgenommen werden (structure from motion) [154, S. 62]. Im Video bleiben die Geschwindigkeitsunterschiede erhalten, sofern diese trotz der Komprimierung, der limitierten Bildwiederholfrequenz, der Auflösungsreduktion und des begrenzten Dynamikbereichs in den Helligkeitsstufen erkennbar ist. Relevante, bewegte Objekte werden jedoch nicht so intuitiv wahrgenommen. In einem Video mit bewegter Kamera bewegt sich alles, ohne dass sich der Beobachter bewegt. Während bei einer eigenen Bewegung unser Gehirn automatisch das Wahrgenommene in ein umgebungsfestes

Koordinatensystem umrechnet und Bewegungen darin intuitiv unsere Aufmerksamkeit anziehen, ist die automatische Bewegungswahrnehmung beim Betrachten eines Videos gehemmt.

Zusätzlich ist bei der Teleoperation grundsätzlich die periphere Wahrnehmung beeinträchtigt, weil die Darstellung im Monitorsetup nicht dimensions- und winkelgetreu ist. Die meist drei Operator-Monitore belegen einen Sichtbereich von unter 180° des Operator-Gesichtsfeldes. Dargestellt werden auf diesen Monitoren jedoch weit über 180° der Fahrzeugumgebung. Diese Verzerrung beeinträchtigt die intuitive, visuell-periphere Wahrnehmung.

Zusätzlich sei angemerkt, dass sich die Komprimierung, die limitierte Bildwiederholfrequenz, die Auflösungsreduktion und der begrenzte Dynamikbereich in den Helligkeitsstufen zwar vor allem auf die Bildsegmentierung auswirken, im Allgemeinen jedoch auch die anderen Wahrnehmungsaspekte wie die Tiefenwahrnehmung oder das periphere Sehen beeinträchtigen.

5.4 Auswirkungen der Veränderungen auf die Ressourcennutzung

In der Tabelle 5.4 ist die Ressourcennutzung der Teilaufgaben während der konventionellen Fahrzeugführung und der teleoperierten Fahrzeugführung gegenübergestellt. Am stärksten sind durch die Teleoperation die Einschätzung der Abmessungen anderer Verkehrsteilnehmer und relevanter Objekte, die Einschätzung der Abmessungen des Egofahrzeugs, die Fahrdynamikeinschätzung und die korrekte Umsetzung der geplanten Trajektorie beeinträchtigt. Diese werden im Nachfolgenden erläutert und stützen sich auf die nachteiligen Veränderungen der Wahrnehmung, die in Tabelle 5.3 erläutert wurden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Ressourcennutzung während der DS ungleichmäßiger verteilt ist. Dies lässt sich besonders anhand der Gegenüberstellung der ersten beiden Zeilen der Tabelle 5.4 erkennen. Es kommt in der Folge schneller zur Überbeanspruchung aufgrund des Ressourcenflaschenhalses einzelner Bereiche des Informationsverarbeitungsprozesses.

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der Ressourcennutzung bei den Teilaufgaben der konventionellen und der teleoperierten Fahrzeugführung innerhalb der Multiplen-Ressourcen-Theorie. Jede zweite, nicht benannte Zeile adressiert die Teilaufgabe in der darüber liegenden Zeile während Teleoperation. Die Werte erstrecken sich über vier Stufen von 0 (nicht genutzt) bis 1 (vollständig genutzt) und werden entsprechend dem Vorgehen nach Wickens [90, S. 168] subjektiv durch den Autor bestimmt.

Teilaufgabe	Stufe			Perzeptive Modalität				Visueller Kanal	
	Perzeption	Kognition	Response	visuell	auditiv	vestibular	haptisch	fokal	peripher
Konventionelles Fahren	0,38	0,19	0,10	0,33	0,14	0,14		0,33	0,38
Teleoperation	0,43	0,67	0,14	0,72	0,00	0,00		0,76	0,28
Wahrnehmung Verkehrsteilnehmer	0,33	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00		0,33	0,33
	0,33	0,33	0,00	0,67	0,00	0,00		1,00	0,33
Einschätzung Abmessungen Verkehrsteilnehmer	0,67	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00		0,33	0,33
	0,67	1,00	0,00	0,67	0,00	0,00		1,00	0,00
Bewegungsantizipation	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00		0,33	0,33
	0,33	0,33	0,00	0,67	0,00	0,00		1,00	0,33
Abmessungen Egofahrzeug	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00		0,33	0,33
	0,67	1,00	0,00	0,67	0,00	0,00		1,00	0,00
Fahrdynamik Egofahrzeug	0,67	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33		0,33	0,33
	0,67	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00		0,33	0,33
Planung Manöver + Trajektorie	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00		0,33	0,33
	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00		0,33	0,33
Umsetzung Trajektorie	0,00	0,00	0,67	0,33	0,33	0,67		0,33	0,67
	0,00	0,67	1,00	1,00	0,00	0,00		0,67	0,67

Die Verschlechterung der korrekten Einschätzung der Abmessungen sowohl der Verkehrsteilnehmer als auch des Egofahrzeugs ist im Wesentlichen durch die deutliche Verschlechterung der Dimensionsklarheit erklärbar. Gerade in Engstellen stellt dieser Zusammenhang Operatoren vor Herausforderungen. Zudem wird die korrekte Einschätzung der Abmessungen durch die reduzierte Tiefenwahrnehmung beeinflusst. Um dennoch eine entsprechend hohe Leistung erbringen zu können, wird angenommen, dass Operatoren die Beeinträchtigungen mit einem erhöhten Kognitionsbedarf kompensieren müssen. Zudem können sich Operatoren aufgrund der nicht dimensionsgetreuen Darstellung weniger auf die visuell-periphere Wahrnehmung stützen und müssen die betroffenen Bereiche über die visuell-fokale Wahrnehmung erfassen.

Die Fahrdynamikeinschätzung ist aufgrund der nicht entsprechend abgebildeten Beschleunigungen und der größtenteils ausbleibenden haptischen Empfindungen beeinträchtigt. Sie muss sich hauptsächlich auf die visuelle Wahrnehmung der Eigenbewegung stützen. Die entsprechenden retinalen Flussfelder können jedoch nicht direkt und intuitiv verwendet werden, weil sie sich aufgrund von unterschiedlichen Kamerapositionierungen verändern. Entsprechend erfordert die Einschätzung der eigenen Fahrdynamik deutlich erhöhte Kognitionsressourcen, um die Einschränkungen kompensieren zu können.

Die Umsetzung der geplanten Trajektorie wird durch mehrere Aspekte verschlechtert. Zum einen setzt sie die Einschätzung der Eigenbewegung voraus, die, wie in der Tabelle 5.3 ausgeführt, beeinträchtigt ist. Darüber hinaus erschwert die systembedingte Latenzzeit die Fahrzeugsteuerung. Zur Kompensation dieser Aspekte müssen vor allem kognitive Ressourcen genutzt werden.

Die Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer und der relevanten Objekte sowie deren Bewegungsantizipation sind nur bedingt beeinträchtigt. Sie werden besonders durch eine Verschiebung von der visuell-peripheren Wahrnehmung hin zur visuell-fokalen Wahrnehmung verändert.

Die Planung des Manövers und der Trajektorie erfahren die geringste Veränderung der Ressourcennutzung und werden deswegen in Tabelle 5.4 als unverändert dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich in den ersten beiden Zeilen der Tabelle 5.4 eine ungünstige Verschiebung der Ressourcennutzung erkennen. Besonders beansprucht sind die visuell-fokale Perzeption und die Kognition. Zudem ist ein Anstieg bei der Response zu erkennen. Diese einseitigen Verschiebungen führen dazu, dass in komplexen Szenarien die Operatoren schneller als bei einer konventionellen Fahrzeugführung ihren verfügbaren Ressourcenverbrauch erreicht haben. Die Konsequenz ist eine geistige Beanspruchung, die sich auf die Leistung der Operatoren auswirken kann.

5.5 Ergebnisse der Beanspruchungsanalyse

In der zweiten Forschungsfrage wird nach den Gründen für die Entstehung von mentaler Beanspruchung und im Besonderen von Überbeanspruchung bei der DS gefragt. Die Analyse der Fahrzeugführungsaufgaben im Kontext des Ressourcenbedarfs anhand der Multiplen-Ressourcen-Theorie geben Aufschluss über die Vorgänge, die zu einer Überbeanspruchung bei der DS alleine aufgrund des Teleoperationssetups führen können. Aufgrund der größtenteils über die Videostreams erfolgenden Informationsaufnahme und der Entkopplung von der tatsächlichen Fahrzeugrückmeldung und –bewegung wird der Ressourcenbedarf zur Fahrzeugführungsaufgabe im Vergleich zum konventionellen Fahrzeugführen ungünstig hin zu einzelnen Ausprägungen der Ressourcendimensionen verschoben und zudem insgesamt vergrößert. Beispielsweise lässt sich anhand der ersten beiden Zeilen der Tabelle 5.4 erkennen, dass besonders die Perzeption-Kognition, die visuelle Perzeption und die fokale Wahrnehmung einen erhöhten Ressourcenbedarf aufweisen, wohingegen die auditive und vestibulär-haptische Modalität und die periphere Wahrnehmung eine annähernd unveränderte oder reduzierte Ressourcennutzung zeigen. In Summe führt das zu einem Flaschenhals in den erhöhten Ressourcendimensionen. Operatoren empfinden das als Überbeanspruchung. Es ist daher anzuraten, den Bedarf der visuellen Perzeption und die Informationserfassung über die fokale Wahrnehmung zu reduzieren.

6 Entwicklung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

Im Hinblick auf die relevanten Szenarien und auf die potenzielle Reduktion der mentalen Beanspruchung ist die Entwicklung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung (MMW) sinnvoll. Die Ziele dieses Kapitels sind, die Anforderungen an die MMW vorzustellen, das Konzept mittels der entsprechenden Veröffentlichung zu präsentieren und die Umsetzung zu beschreiben, die als Open-Source Software verfügbar ist [202, 203]. Dieses Kapitel baut im Wesentlichen auf den Inhalten aus [180] auf. Die Entwicklung wird anschließend für die Untersuchung der dritten und vierten Forschungsfragen verwendet.

6.1 Relevanz von Szenario-spezifischen Teleoperationsarten

Die DS ist eine Lösungsmöglichkeit für die Vielzahl der Szenarien, die für automatisierte Fahrzeuge herausfordernd und in Abschnitt 4.1 beschrieben sind. Einige Szenarien, wie das des ungewöhnlichen Objekts, bedürfen jedoch nicht des Funktionsumfangs der DS. Eine direkte Behebung der Problemursache, nämlich die passende Kategorisierung des ungewöhnlichen Objekts, würde für die Situationslösung ausreichen.

Zudem erzeugt die DS eine ungünstig verteilte und erhöhte Nutzung der mentalen Ressourcen, die die Operatoren als stark beanspruchend empfinden können (Kapitel 5). Eine erhöhte Beanspruchung provoziert das Aufkommen von menschlichen Fehlern in der Leitwarte (Abschnitt 2.4). Die ursächliche Problembeseitigung ist in ihrem Ressourcenbedarf deutlich genügsamer. Bei der korrekten Klassifizierung eines Objektes entfällt ein Großteil der Teilaufgaben, die für die DS notwendig sind und in Abschnitt 5 beschrieben sind. Zum Beispiel sind das Einschätzen der Abmessungen der Verkehrsteilnehmer und des Egofahrzeugs sowie die Kenntnis über die eigene Fahrdynamik für die korrekte Kategorisierung eines Objekts nicht notwendig.

Außerdem ist für das Betreiben einer automatisierten Fahrzeugflotte wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben eine Leitwarte erforderlich. Folglich bietet es sich an, alle Tätigkeiten, die von einem üblichen Leitwartenarbeitsplatz aus sinnvoll ausgeführt werden können, auf einen Leitwartenarbeitsplatz zu übertragen und nur so wenige aufwändige und teure Teleoperationsplätze wie notwendig einzurichten. Das Leitwartenpersonal hätte die Möglichkeit, Fahrzeugstillstände wegen ungewöhnlicher Objekte direkt selbst beheben zu können. Dieser Trend lässt sich auch bei Kettwich [58, S. 5] erkennen, die ein Visualisierungskonzept für einen Leitwartenarbeitsplatz entwickelte, der keine DS enthält.

6.2 Methodik der Modifizierung zur Beanspruchungsreduktion

Die Ausführungen im Abschnitt zur Multiplen-Ressourcen-Theorie erklären größtenteils die erhöhten Beanspruchungswerte im Stand der Wissenschaft (Abschnitt 2.2.4). Zugleich zeigen sie weiteres Verbesserungspotential auf. Besonders die visuell-fokale Perzeption und die Kognition sind bei der DS überbeansprucht.

Hervorgehoben werden kann die Modifizierung von technischen Unzulänglichkeiten, die das Potential hat, die überbeanspruchten Ressourcen zu entlasten. Das wird unter den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Teleoperationsarten vor allem durch die Ideen zur Modifizierung der Wahrnehmung von Kettwich [58, S. 7] und Zoox [53, S. 40] adressiert. Sie beschreiben die Möglichkeit des Operators, von der maschinellen Wahrnehmung detektierte Objekte, die nicht hinderlich sind, als solche zu markieren. Dem Fahrzeug wird dadurch die Weiterfahrt ermöglicht.

In Bezug auf die visuell-fokale Wahrnehmung erzielt die Modifizierung eine deutliche Reduktion des mentalen Ressourcenbedarfs im Vergleich zu der DS, weil der Operator nicht die komplette Umgebung nach relevanten Verkehrsteilnehmern oder Objekten scannen muss. Er ist lediglich für das betroffene Objekt verantwortlich. Außerdem übernimmt die Automation die Fahrzeugführung. Dadurch entfällt die Teilaufgabe der Einschätzung der Abmessungen der Verkehrsteilnehmer und des Egofahrzeugs, die wiederum die visuell-fokale Wahrnehmung, wie in Abschnitt 5 beschrieben, beanspruchen. Zudem ist die Kognition aufgrund der Übernahme der Fahrzeugführung durch die Automation weniger beansprucht, weil unter anderem die Teilaufgaben der Einschätzung der eigenen Fahrdynamik, die Manöver- und Trajektorienplanung und die Trajektorienumsetzung entfallen.

6.3 Anforderungen

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an das Konzept der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung gestellt.

Mit Hilfe der Steuerungsart muss eine bestimmte Unzulänglichkeit des AF bewältigt werden können. Adressiert wird das ungewöhnliche Objekt, das in Abschnitt 4.1.1 beschrieben ist. Der Trajektorienplaner des AF findet aufgrund einer fehlerhaften Hinderniserkennung keinen befahrbaren Pfad. Bei der fehlerhaften Hinderniserkennung kann es sich um eine falsch positive Erkennung oder ein ungewöhnliches Objekt handeln, die überfahren werden können.

Die zweite Anforderung ist, dass die zu entwickelnde Steuerungsart die Beanspruchung des Operators senkt. Darüber hinaus muss die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung in die relevante Systemarchitektur automatisierter Fahrzeuge integriert werden können, um eine realistische Chance auf eine spätere Anwendung zu haben. Sie soll deshalb in eine existierende Sense-Plan-Act-Architektur integriert werden.

Das Konzept der MMW soll zudem Grenzen aktueller Algorithmen berücksichtigen, damit das Konzept realistisch umgesetzt werden kann. In dem konkreten Anwendungsfall kann nicht von einem zuverlässigen Objekttracking ausgegangen werden.

6.4 Konzept und Systemstruktur

In Abbildung 6.1 wird die Integration des Konzepts der MMW in den Software-Stack eines automatisierten Fahrzeugs gezeigt. Das Modul wird entsprechend als Fahrzeug- bzw. Operator-MMW bezeichnet. Die Fahrzeug-MMW ist zwischen dem Ausgang der Wahrnehmung und dem Eingang in die Verhaltens- und Trajektorienplanung platziert. Die direkte Verbindung von Wahrnehmung und Planung, wie sie in der normalen Anwendung der Sense-Plan-Act-Architektur zu finden ist, ist unterbrochen. Der Operator gibt über die Mensch-Maschine-Schnittstelle den zu ignorierenden Bereich ein. Die Operator-MMW prozessiert die Eingaben des Operators bezüglich des zu ignorierenden Bereichs und dessen Status und schickt diese an die Fahrzeug-MMW weiter. Der Bereichsstatus kann die Zustände „in Planung“, „unter Begutachtung“ und „freigegeben“ haben. Während des Status in Planung kann der Operator Eingaben ohne jegliche Auswirkung auf die Fahrfunktion tätigen. Im Status unter Begutachtung wird die Eingabe des Operators an die Planung weitergegeben, der Ausgang der Planung jedoch nicht an die Aktuatoren. Der Operator kann so die voraussichtlichen Auswirkungen seiner Modifizierung begutachten (Löschen der Detektionen und zukünftige Trajektorie). Im Status freigegeben werden die Modifizierungen des Operators an die Aktuatoren weitergegeben. Das Fahrzeug kann mit dessen Hilfe im Idealfall seine Fahrt fortsetzen.

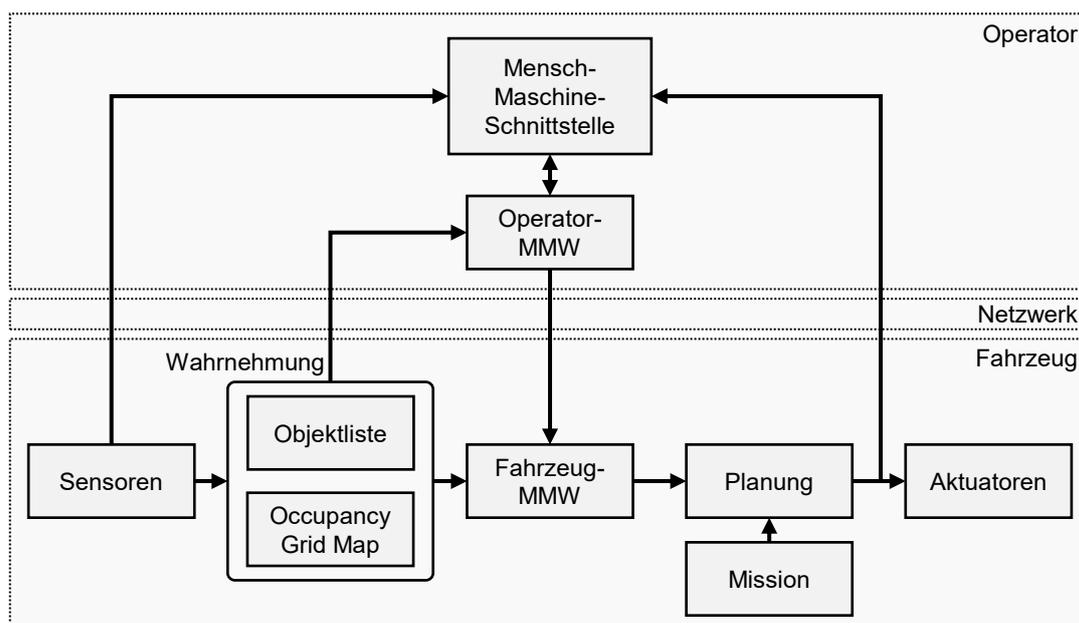


Abbildung 6.1: Integration der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung in die Architektur eines automatisierten und teleoperierten Fahrzeugs nach [180] (Übersetzung des Autors).

Wie in Abbildung 6.2 schematisch dargestellt, kennzeichnet der Operator über einen Polygonzug den Bereich, der frei von hinderlichen Objekten ist. Unterschiedliche Arten der Eingabe über einen Touchscreen oder einen Stift sind denkbar. Nach der Freigabe des Bereichs durch den Operator werden darin befindliche Detektionen ignoriert.

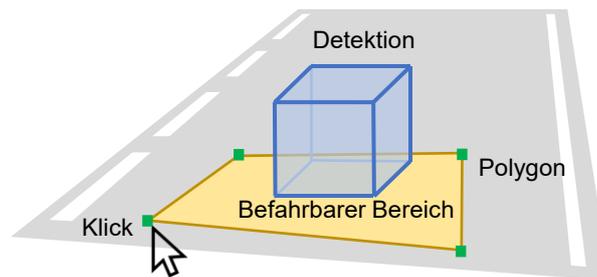


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Eingabe eines Polygonzugs durch den Operator. Die als Würfel dargestellte Erkennung wird nach Freigabe des Operators nicht an die Planung weitergegeben.

Die Art, den Operator einen Bereich über einen Polygonzug spezifizieren zu lassen, wird gewählt, um damit möglichst viele Komplikationen der Wahrnehmung adressieren zu können. Ebenfalls wäre es denkbar, fälschlicherweise als hinderlich erkannte Objekte direkt durch Anklicken zu markieren. Das setzt jedoch voraus, dass das Objekttracking fehlerfrei funktioniert. Das Objekttracking ist dafür zuständig, dass Objekte über den regelmäßig wiederkehrenden Erkennungszyklus hinweg konsistent identifiziert werden. Üblicherweise wird den Objekten eine Identifikationsnummer zugewiesen, so dass eine Bahn mit der zeitlichen Abfolge der Posen erstellt und gespeichert werden kann [34]. Es gibt jedoch kein fehlerfreies Objekttracking [204]. Wenn das Objekttracking das vom Operator markierte Objekt nicht wieder identifiziert, müsste der Operator das Objekt erneut markieren. Um das zu verhindern, markiert der Operator den entsprechenden Bereich und ist deswegen nicht auf ein Objekttracking angewiesen.

Darüber hinaus kann zusätzlich zur Objektliste als Ausgang der Wahrnehmung eine Occupancy Grid Map (Rasterkarte) zum Einsatz kommen, in der Hindernisse nicht über eine verfolgbare Objektrepräsentation dargestellt werden, sondern über einen Frei-Belegt-Status. In diesem Fall muss nicht zwingend eine Objektrepräsentation vorliegen, die durch den Operator markiert werden könnte. Es wäre jede Zelle der Rasterkarte einzeln zu markieren. Das Markieren eines Bereichs hingegen umgeht dieses Problem, weil über die räumliche Definition eines Polygonzugs alle belegten Rasterkarteneinträge mit wenigen Klicks markiert und ignoriert werden können.

6.4.1 Verantwortungsteilung

Die Verantwortung ist zwischen der automatisierten Fahrfunktion und dem Operator nach Bereichen aufgeteilt. Der Operator ist ausschließlich für den von ihm markierten Bereich und die Objekte, die in diesen Bereich eintreten, zuständig. Der übrige Bereich ist von der Modifizierung der Wahrnehmung nicht betroffen und wird weiterhin von der Fahrzeugautomatisierung berücksichtigt. Letztendlich wird die Verhaltens- und Trajektorienplanung nicht direkt durch den Operator beeinflusst. Der Operator greift in keine Module der Fahrzeugautomatisierung ein, sondern verändert deren Input oder Output. Zeitlich gilt die Freigabe durch den Operator bis zum Überfahren der Detektion.

6.4.2 Funktionsgrenze

Es ist Aufgabe des Operators, Situationen zu identifizieren, die mit dem Konzept der MMW nicht lösbar sind. Beispielsweise dürfen nicht-überfahrbare Objekte nicht als überfahrbar markiert werden. Zudem darf die Sicht des Operators nicht durch Verdeckungen und tote Winkel derart behindert werden, dass dieser nicht in der Lage ist, den markierten Bereich vollständig zu überwachen oder in den Bereich eintretende Objekte wahrnehmen zu können. Tritt eine solche Situation auf, kann auf andere Steuerungsarten wie der DS zurückgegriffen werden.

6.5 Umsetzung und verwendete Algorithmen

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung der MMW und ihre Bedienung durch den Operator vorgestellt. Weiterhin ist die Einbettung der MMW in eine automatisierte Fahrfunktion notwendig, um ihre Funktionalität vollständig zeigen zu können. Deswegen wird nachfolgend eine prototypische Umsetzung einer automatisierten Fahrfunktion vorgestellt, in dessen Kontext die MMW angewendet wird.

6.5.1 Umsetzung

Es wird auf den bestehenden Software-Stack zum Teleoperierten Fahren aufgebaut [202]. Dieser bietet die grundlegenden Funktionalitäten wie die Visualisierung der Sensordaten, das Verwalten der Teleoperationssitzung (Verbinden, Trennen, Wahl des Steuerungsmodus) oder das Erzeugen von Steuersignalen an. Bei der MMW handelt es sich um einen neuen Steuerungsmodus. Dementsprechend wird ein neues Package namens „Perception Modification“ in der Kategorie der Steuerungsarten erstellt, das die 3D-Koordinaten der Operator-Klicks und seine Tastatureingaben verwertet, an das Fahrzeug überträgt und dort entsprechend umsetzt. Die prototypische Umsetzung aus Sicht des Operators ist in Abbildung 6.3 gezeigt.

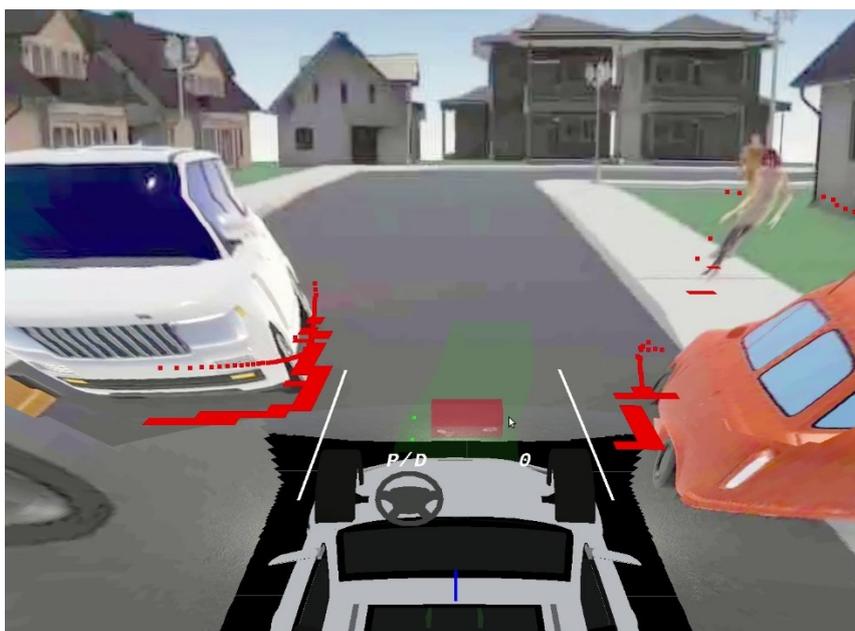


Abbildung 6.3: Sicht des Operators bei der MMW

Die in Abbildung 6.3 dargestellte Anzeige wurde erweitert, damit sie die Klicks des Operators in der 3D-Umgebung erfasst und visualisiert. Diese werden als Klicks auf den Boden erfasst. Die Koordinaten des Bodenpunktes werden entsprechend errechnet und als grüne Punkte dargestellt. Sie sind in Abbildung 6.3 vor dem Egofahrzeug neben der roten Objektdetektion zu sehen.

6.5.2 Bedienung

Der Operator bedient die MMW in der vorliegenden Implementierung über die Tastatur und die Maus. Der Prozess zum Ignorieren einer Detektion ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Für die Erklärung der Bedienung wurden die Videostreams ausgeblendet. Zu sehen sind die Bodenfläche als weißes Gitter, der Pfad als grünes Band, die bei aktuellem Lenkwinkelschlag von den vier Rädern befahrenen Linien als weiße Linien und die Detektion als roter bzw. blauer Quader. Nach dem Verbinden mit dem Fahrzeug und der Auswahl der Steuerungsart im Operator-Manager wird dem Operator die Situation gezeigt (a). Anschließend kann der Operator über die linke Maustaste den Polygonzug auf dem Boden der virtuellen dreidimensionalen Umgebung erstellen (b). Sobald ein Objekt erfasst wurde, wechselt dieses die Farbe von Rot nach Blau. Über Enter bestätigt der Operator und gibt anschließend die Weiterfahrt frei (c). Die voreingestellte Geschwindigkeit von 4 km/h pro Stunde kann über das Keyboard verändert werden.

Der Operator kann seine Eingaben jederzeit über die Taste Entfernen rückgängig machen. Über die Taste Escape kann zudem eine Notbremsung eingeleitet werden.

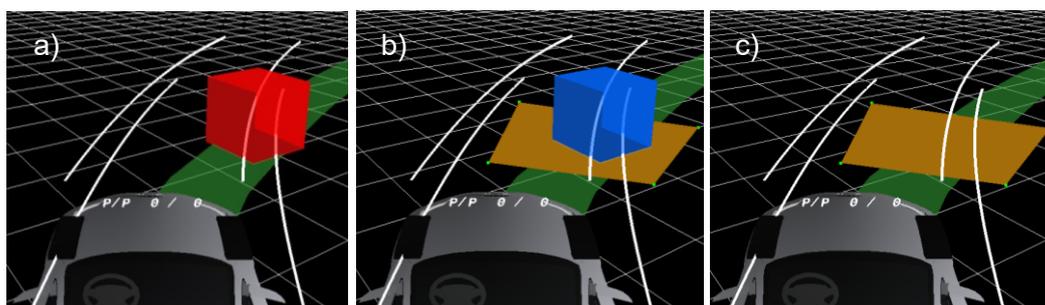


Abbildung 6.4: Ablauf der MMW bei bewusst ausgeblendeten Videostreams. a) Das Fahrzeug kommt zum Stillstand und die rot eingefärbte Detektion verhindert eine Weiterfahrt. b) Der Operator umschließt die Detektion über einen Polygonzug. Die Detektion wird dadurch blau eingefärbt. c) Der Operator bestätigt seine Eingabe und entfernt dadurch die Detektion. Das Fahrzeug setzt seine Fahrt fort.

6.5.3 Automatisierte Fahrfunktion

Die automatisierte Fahrfunktion wird in einer einfachen Form umgesetzt, um das Konzept der MMW zu zeigen. Die entsprechenden Softwarekomponenten können ebenfalls über [203] eingesehen werden. Die automatisierte Fahrfunktion umfasst Funktionen, mit deren Hilfe das Fahrzeug eine vorgegebene Route abfährt, hinderliche Objekte detektiert und eine Kollision durch Bremsen verhindert. Die Fahrfunktion reagiert nicht mit einer Anpassung des Pfades auf Hindernisse. Die Fahrfunktion bietet kein Umfahren von Hindernissen an.

Die Umsetzung ist an die in Abbildung 6.1 dargestellte Architektur angelehnt. Auf der Basis der Lidardaten wird eine Objektliste und eine Occupancy Grid Map erstellt.

7 Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

In diesem Kapitel werden mit Hilfe der vorgestellten Entwicklung die dritte und die vierte Forschungsfrage beantwortet. Zwei Aspekte werden vorab zur Vorbereitung durchgeführt. Zum einen wird eine Schulung entwickelt, die anschließend von den Operatoren durchlaufen wird. Zum anderen wird die Operationalisierung der mentalen Beanspruchung behandelt. Daraufhin wird die Durchführung der Probandenstudie beschrieben. Es schließt sich die statistische Auswertung der Studiendaten an.

7.1 Schulung der Versuchspersonen

Für die Untersuchung werden Versuchspersonen mit einem geeigneten Kenntnis- und Fähigkeitsstand benötigt. Weil die Teleoperation von Straßenfahrzeugen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Manuskripts keine breite Anwendung hat, kann nicht auf bereits ausgebildete Versuchspersonen zurückgegriffen werden. Die Schulung hat deshalb zum Ziel, Versuchspersonen in geeigneter Weise auf die Untersuchung vorzubereiten.

7.1.1 Lernziele

Gemäß dem Leitfaden nach Kennedy [181] werden zunächst die Lernziele der Schulung zur Teleoperation erstellt. Diese werden im Folgenden vorgestellt:

1. Die Versuchsperson soll sich nach einer Aufforderung mit dem (simulierten) Fahrzeug verbinden und trennen können.
2. Die Versuchsperson soll die entsprechende Steuerungsart (DS, MMW) und das passende Eingabegerät auswählen können.
3. Die Versuchsperson soll die Anzeige und deren Elemente richtig zu interpretieren wissen (Tachometer, Ganganzeige, Videos, Fahrspur).
4. Die Versuchsperson soll verstehen, dass die Abmessungen des teleoperierten Fahrzeugs denen des gezeigten Fahrzeugs entsprechen.
5. Die Versuchsperson soll mit der Visualisierung passend interagieren können (Ansicht und Perspektive verändern, Punkte auf den Boden klicken).
6. Die Versuchsperson soll über die Eigenschaften der DS Bescheid wissen (Eingabegerät idealerweise Lenkrad und Pedal, Fahrpedal stellt die Geschwindigkeit nicht den Drehmomentwunsch, Fahrpedal erhöht die Geschwindigkeit, Bremspedal verringert die Geschwindigkeit, keine Kollisionserkennung oder -vermeidung vorhanden, Automatikgetriebe).

7. Die Versuchsperson soll die DS in neuen bzw. relevanten Szenarien korrekt bedienen.
8. Die Versuchsperson soll die DS in neuen bzw. relevanten Szenarien kollisionsfrei fahren können.
9. Die Versuchsperson soll die Eigenschaften der MMW verstehen (Fahrzeug agiert im automatisierten Modus, Operator kann Detektionen und Reflektionen mittels eines Bereichs entfernen).
10. Die Versuchsperson soll die MMW in neuen oder relevanten Szenarien korrekt bedienen (Tastenbelegung, Maus).
11. Die Versuchsperson soll die MMW in neuen oder relevanten Szenarien kollisionsfrei beherrschen (nichts entfernen, was nicht überfahren werden darf).
12. Die Versuchsperson soll die Systemkonfiguration der Teleoperation kennen und sich der Konsequenzen bewusst sein (Latenz, geringere Videoqualität, kein Ton, keine vestibuläre Rückmeldung).
13. Die Versuchsperson weiß, dass in der Simulation kein realer Schaden verursacht werden kann und bei den Fahrten mit dem realen Fahrzeug ein Sicherheitsfahrer anwesend ist.
14. Die Versuchsperson kennt das Anwendungsgebiet und das Vorgehen zur Situationlösung (Pkw, AF, kurze Szenarien, lösbar über eine Fahrt von wenigen Metern).

7.1.2 Einordnung in die Lehrtaxonomie

Die oben konkretisierten Lernziele werden in der Tabelle 7.1 durch den Autor in die von Anderson [182, S. 4] überarbeitete Taxonomietabelle eingeordnet. Eine übersichtliche Zusammenfassung der Definitionen liefert Krathwohl [184]. Die Taxonomietabelle wird anhand der Wissensdimension (faktisches Wissen, konzeptuelles Wissen, Prozess- und Methodenwissen, metakognitives Wissen) und der kognitiven Prozessdimension aufgespannt.

Tabelle 7.1: Einordnung der Lernziele der Teleoperation (Nummer 1-14 aus Abschnitt 7.1.1) in die von Anderson [182, S. 4] überarbeitete Taxonomietabelle (Übersetzung durch den Autor)

	Erinnern	Verstehen	Anwenden	Analysieren	Evaluieren	Erstellen
Faktisches Wissen	13	3, 4, 6, 9	1, 2, 5			
Konzeptuelles Wissen		12, 14				
Prozess- und Methodenwissen			7, 8, 10, 11			
Metakognitives Wissen						

Entlang der kognitiven Prozessdimension fällt ein Großteil der Lernziele in die Stufe der Anwendung, weil es sich dabei um die Ausführung von umfangreichen Prozeduren oder die Anwendung von einfachem faktischem Wissen geht. Für die meisten weiteren Lernziele genügt

ein Verständnis von faktischem oder konzeptuellem Wissen (Prinzipien und Strukturen), um die Szenarien korrekt interpretieren zu können und die richtigen Schlussfolgerungen zu treffen.

7.1.3 Lehrkonzept

Anhand dieser Einstufung kann auf vorzuziehende Lehrmethoden geschlossen werden, weil entsprechend den Lernzielen unterschiedliche Herangehensweisen benötigt werden [182, S. 8]. Die für die Teleoperation notwendigen Fähigkeiten sind hauptsächlich sich wiederholende Fähigkeiten. Diese zeichnen sich durch die meist gegebene Übertragbarkeit auf neue, aber ähnliche Herausforderungen aus [185, S. 32]. Sie verbessern sich mit der Zeit und der Häufigkeit der Anwendung. Produktive Fähigkeiten hingegen zielen auf die Fähigkeit ab, neue und passende Lösungsstrategien für jede neue Herausforderung zu erarbeiten.

Die einzelnen Schritte der Teleoperation werden in den nachfolgenden Punkten aufgelistet. Die Schritte sind mit Ausnahme der „Interpretation und Beurteilung der Situation“ Aktionen, die sich mit kleinen Unterschieden auf sämtliche zu lösende Situationen übertragen lassen. Deswegen ist die Teleoperation eine Aufgabe, für deren Lösung sogenannte sich wiederholende Fähigkeiten benötigt werden.

Ablauf der Teleoperation:

1. Benachrichtigung über Lösungsanfrage und Verbinden zum Fahrzeug
2. Interpretation und Beurteilung der Situation
3. Lösung der Situation mittels Teleoperation falls möglich
4. Trennung vom Fahrzeug

Die drei Stufen der passenden Lehrstrategie für sich wiederholende Fähigkeiten sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Diese sind die Vermittlung des Wissens, die Vermittlung der praktischen Anwendung und die Entwicklung der Fertigkeiten. Innerhalb der ersten beiden Stufen wird dabei im Wesentlichen auf erklärende Lehrmethoden zurückgegriffen.

Tabelle 7.2: Stufen der Lehrstrategie für sich wiederholende Fähigkeitsart nach Romiszowski [185, S. 33]

Stufe	Sich wiederholende Fähigkeiten
1. Vermittlung des Wissens	Erklärende oder entdeckende Lehrmethoden (abhängig vom Wissenstyp)
2. Vermittlung der praktischen Anwendung	Erklärende Methoden (Vorführung und direktes Üben). Vermittlung des Wissens und der praktischen Anwendung kann kombiniert werden
3. Entwicklung der Fertigkeiten	Beaufsichtigtes Üben. Fortlaufende Rückmeldung der Ergebnisse

Die vier Stufen der erklärenden Lehrmethode sind nach Romiszowski [185, S. 26]: (a) Informationen präsentieren, (b) Wahrnehmung und Verständnis testen, (c) Übungsmöglichkeiten bieten (korrekte Bedienung prüfen und Schwierigkeit steigern) und (d) echte Anwendungen geben und lösen lassen.

Weiter rät Sahami [205, S. 51] speziell für den Anwendungsfall von Fahrsimulatoren, dass die Szenarien umfänglich den Bereich der Lenkung, Beschleunigung und Bremsung abdecken sollten, damit die Versuchspersonen ein Gefühl für die Bedienung bekommen, und dass die

Versuchspersonen die Szenarien wiederholt durchfahren, damit sie ihre Fahrweise anpassen können.

7.1.4 Schulungsaufbau und Schulungsablauf

Die Tabelle 7.3 gibt den Aufbau der Schulung wieder. Die Stufen der Lehrstrategie und der erklärenden Lehrmethode folgen der Nomenklatur des vorherigen Kapitels.

Tabelle 7.3: Terminübersicht über die Probandenschulung und deren Lehrinhalt und entsprechende Stufen

Termin	Stufe Lehrstrategie	Stufe Erklärende Lehrmethode	Inhalt
1	1	a	Teleoperation allgemein
	1 und 2	a, b, c	Visual und Manager: Einführung und Benutzung
	1 - 3	a, b, c	DS: Erklärungen und Fahrübungen
	1 - 3	a, b, c, d	MMW: Erklärungen und Fahrübungen
2	3	c, d	DS: 5 Szenarien, 8 Fahrten; Zunächst in Simulation, anschließend mit Realfahrzeug
	3	c	MMW: 7 Szenarien in Simulation

Der Termin 1 führt die Versuchspersonen im Wesentlichen in die Thematik der Teleoperation ein, indem mittels einer Präsentation und Lehrvideos der Anwendungsfall der Teleoperation erläutert wird, die Bedienung der Software Schritt für Schritt erklärt wird und sich die Versuchspersonen anhand einfacher Szenarien mit der Handhabung der Steuerungsarten vertraut machen können.

Der Termin 2 soll die erlernten Fähigkeiten verfestigen und die Handhabung verfeinern. Nach einer kurzen Auffrischung des Wissens von Termin 1 üben die Versuchspersonen die Steuerungsarten in Szenarien steigender Schwierigkeit, die den Szenarien der sich anschließenden Hauptstudie ähneln. Die DS üben sie in einer Simulationsumgebung und am Realfahrzeug in den jeweils gleichen Szenarien. Das Realfahrzeug ist ein modifizierter Audi Q7. Die Fahrten finden auf dem Campus der Technischen Universität München in Garching statt. Es werden die Szenarien 1-4 und 6 von Georg [13] verwendet. Bei den Szenarien 4 und 6 werden die Abstände der Schaumstoffwürfel von 2,45 m auf 2,60 m erhöht, weil die Aufgaben nach Einschätzung des Autors sonst zu schwierig sind. Ansonsten sind die Szenarien unverändert. Über etwaige Kollisionen und deren Lage sowie Fehlbedienungen werden die Versuchspersonen direkt informiert, damit sie ihre Fertigkeiten anpassen können. Die Schulung findet ohne Zeitdruck statt.

Die Versuchspersonen absolvieren die beiden Schulungstermine einzeln und mit ca. einer Woche Abstand zwischen den Terminen.

Nach Hock [206, S. 110] sind für die Testung der Eignung der Versuchspersonen drei Möglichkeiten gegeben: Selbsteinschätzung, Prüfung von Leistungsgrößen und Prüfung des mentalen Modells mit Wissensfragen. Die Versuchspersonen wurden nach ihrer Selbsteinschätzung gefragt. Zudem wird bei der DS die Anzahl der Kollisionen während der Schulung ausgewertet. Bei der MMW können höchstens Fehlbedienungen auftreten, über die die Versuchspersonen direkt während der Schulung informiert werden.

7.2 Operationalisierung der mentalen Beanspruchung

Ziel dieses Kapitels ist es, die Erhebung der mentalen Beanspruchung und die damit verknüpfte Datenaufbereitung zu erläutern. Dazu wird die Auswahl der subjektiven und physiologischen Messvariante begründet und deren Erhebung detailliert beschrieben. Mittels einer Vorstudie [207] werden die Kenngrößen festgelegt, die in der Hauptstudie erhoben werden.

7.2.1 Leistungsbasierte Messung

Eine Erhebung der mentalen Beanspruchung anhand leistungsbasierter Messungen wird in dieser Arbeit ausgeschlossen, weil nach dem Workload-Performance-Modell nach De-Waard, siehe Abbildung 2.9, keine merklichen Performanceunterschiede zwischen den Bereichen A1, A2 und A3 trotz einer für den Operator spürbar unterschiedlichen Beanspruchung zu erwarten sind. Performanceunterschiede sind erst bei Über- oder Unterbeanspruchung festzustellen. Für die vorliegende Untersuchung sind Unterschiede entlang der Bereiche A1 bis A3 von Interesse. Die Performance eines Operators ist deswegen keine geeignete Messgröße, weil sie für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand die mentale Beanspruchung nicht ausreichend genau misst.

7.2.2 Physiologische Messung

In dieser Arbeit werden physiologische Größen zur Bestimmung der mentalen Beanspruchungsunterschiede verwendet. Dies ist angeraten, weil nach Miller [101, S. 6] im wissenschaftlichen Kontext mindestens zwei Messarten verwendet werden sollten. Wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben eignet sich die leistungsbasierte Messung für den vorliegenden Anwendungsfall nicht. Somit wird auf die physiologischen und subjektiven Messverfahren zurückgegriffen. Als physiologische Größen werden die HLW und die HRV erhoben. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Vorbereitungen für die Messungen dieser Größen getroffen.

Setup

Zur Messung wird ein Set des Herstellers Flux gewählt [208]. Dieses Gerät bietet in Kombination mit der frei erhältlichen Software zum Auslesen der Signale die Möglichkeit, direkt auf die unverfälschten Messungen zuzugreifen. Boucsein [128, S. 1027] empfiehlt für eine wissenschaftliche Auswertung die visuelle Inspektion des Messschriebs, wofür ein direkter Zugriff auf die Messungen notwendig ist. Zudem testete Batista [209, S. 32] die Messgenauigkeit des in dieser Arbeit verwendeten Sets gegen das Referenz- und Expertengerät BioPac MP35 Student Lab Pro. Weil nur geringe Unterschiede festgestellt werden konnten, wird angenommen, dass das Set von Flux für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet werden kann. Die Abtastfrequenz beträgt für die HLW-Messung und die Herzaktivitätsmessung 1000 Hz. Als Elektroden für die HLW-Messungen werden vorgegelte Elektroden des Typs Covidien Kendall Arbo H124SG verwendet [210]. Dabei handelt es sich um nach Posada-Quintero [211, S. 5] empfohlene Ag/AgCl-Elektroden, auf denen Hydrogel angebracht ist. Für die EKG-Messung werden Klebeelektroden mit Festgel [212] verwendet.

Hautleitwert

Das Ziel dieses Abschnittes ist es, die Auswertung des HLW vorzubereiten. Das Vorgehen dazu besteht aus den Schritten der Aufteilung des HLW-Signals in ein phasisches und ein tonisches Maß, der Identifikation von HLW-Artefakten und der Identifikation von HLW-Reaktionen. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben diese Schritte und die Wahl der entsprechenden Algorithmen.

Aufteilung in phasische und tonische Komponenten

Die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten HLW-Kenngrößen beruhen auf der Annahme, dass sich der HLW aus einem sich langsam verändernden Grundniveau (tonisches Grundniveau) und den dynamischen HLW-Reaktionen (phasische HLW-Reaktionen) zusammensetzt. Das tonische Grundniveau und die dynamischen HLW-Reaktionen können nicht separat gemessen werden, sondern müssen aus dem HLW berechnet werden. Für diese Aufteilung wird der von Greco [213] vorgeschlagene Algorithmus cvxEDA verwendet. Dieser Algorithmus hat sich in einigen Untersuchungen bewährt [214–217] und wurde seit seiner Veröffentlichung im April 2016 189 Mal in Scopus gelisteten Veröffentlichungen zitiert (Stand 05.01.2022). Vor der Aufteilung in phasisch und tonisch wird das HLW-Signal zunächst mit dem Butterworth-Tiefpassfilter (obere Grenzfrequenz von 3 Hz) geglättet, weil ansonsten aufgrund der Auflösungsgrenze von 0,0244 μS des HLW-Sensors Stufensprünge auftreten.

Identifikation von Hautleitwertartefakte

Im Folgenden wird die Entstehung von Artefakten beschrieben, das Vorgehen zur Identifizierung der Artefakte argumentiert und die in dieser Arbeit angewendeten Kriterien zur Identifizierung der Artefakte gelistet. Die identifizierten Bereiche mit Artefakten werden aus den Messdaten entfernt [129, S. 186].

Artefakte in der HLW-Messung können unterschiedliche Gründe haben. Boucsein [128, S. 1027] zählt dazu Veränderungen des Haut-Elektroden-Kontakts hervorgerufen zum Beispiel durch Druck auf die Elektroden, Zug an den Kabeln oder Verschiebungen und Veränderungen des Kontaktgels. Weitere Gründe für Artefakte können größere Bewegungen der Versuchsperson, unregelmäßige Atmung oder das bloße Reden sein [128, S. 1027].

Zum Identifizieren der Artefakte inspiziert der Autor alle auszuwertenden HLW-Aufzeichnungen visuell [129, S. 183] und markiert Bereiche, die nach den im Folgenden beschriebenen Kriterien als Artefakt zählen. Die dazu verwendete Software wurde vom Autor erstellt und öffentlich zur Verfügung gestellt [218].

Frei verfügbare Algorithmen zur automatisierten Identifizierung sind verfügbar, wurden aber für die Daten von Armbanduhren entwickelt [214, 219–221]. Die Daten von Armbanduhren unterscheiden sich von denen des Plux-Sets, weil sie keine aufgeklebten Elektroden verwenden, mit niedrigeren Abstraten arbeiten und größeren Bewegungen unterliegen. Für eine Übertragung der Algorithmen auf das vorliegende Setup müssten sie deswegen neu trainiert werden. Für das Trainieren sind allerdings mehr gelabelte Daten notwendig, als in dieser Arbeit erhoben werden. Zudem sollten nach Boucsein [128, S. 1027] die Daten trotz automatischer Identifikation von Artefakten visuell überprüft und die identifizierten Abschnitte visuell inspiziert werden, um einen rechtmäßigen Ausschluss zu verifizieren. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Artefakte benannt und definiert.

Werte außerhalb des messbaren Bereichs

Der messbare Bereich der vorliegenden Messapparatur liegt zwischen $0,05 \mu\text{S}$ und $25 \mu\text{S}$ [208]. Messabschnitte, deren Messungen gleich diesen Werten sind, werden von der Auswertung ausgeschlossen [222, S. 18], weil zu erwarten ist, dass der tatsächliche Verlauf des Signals in diesen Messabschnitten über die Grenzen der Messapparatur hinausgeht.

Plötzlicher Abfall des Hautleitwerts und Signalschwankungen

Ein plötzlicher Abfall des HLW ist physiologisch nicht erklärbar und wird deswegen als Fehler deklariert, wie es in Abbildung 7.1 links dargestellt ist [219, S. 3]. Als plötzlich werden Abfälle von mindestens $0,5 \mu\text{S/s}$ gesehen. Außerdem sind Signalschwankungen physiologisch nicht erklärbar, siehe Abbildung 7.1 rechts. Diese sind charakterisiert über Steigungen von mindestens $0,5 \mu\text{S/s}$ und mindestens zwei Richtungswechsel innerhalb von 2 Sekunden. Diese werden ebenfalls ausgeschlossen.

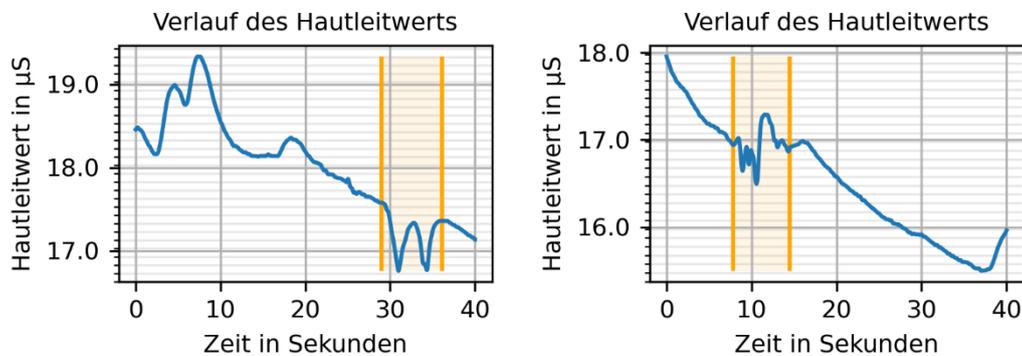


Abbildung 7.1: Plötzlicher Signalabfall (links) und Signalschwankungen (rechts) in den Messungen des HLW.

Fehlerhafte Aufteilung in phasisches und tonisches Maß

Der Algorithmus zur Aufteilung in phasisches und tonisches Maß erzeugt bei Sprüngen im HLW Unterschwinger im tonischen Signal, die physiologisch nicht erklärbar sind. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Die Entstehung für die Unterschwinger liegt teilweise in dem von Greco [213, S. 799] verwendeten Beobachtungsmodell, das keine Sprünge im HLW abdeckt, die zum Beispiel durch Bewegungen der Elektroden induziert werden. Dieses Verhalten lässt sich nicht durch Parameterfitting beheben. Aus diesem Grund werden die betroffenen Bereiche ausgeschlossen.

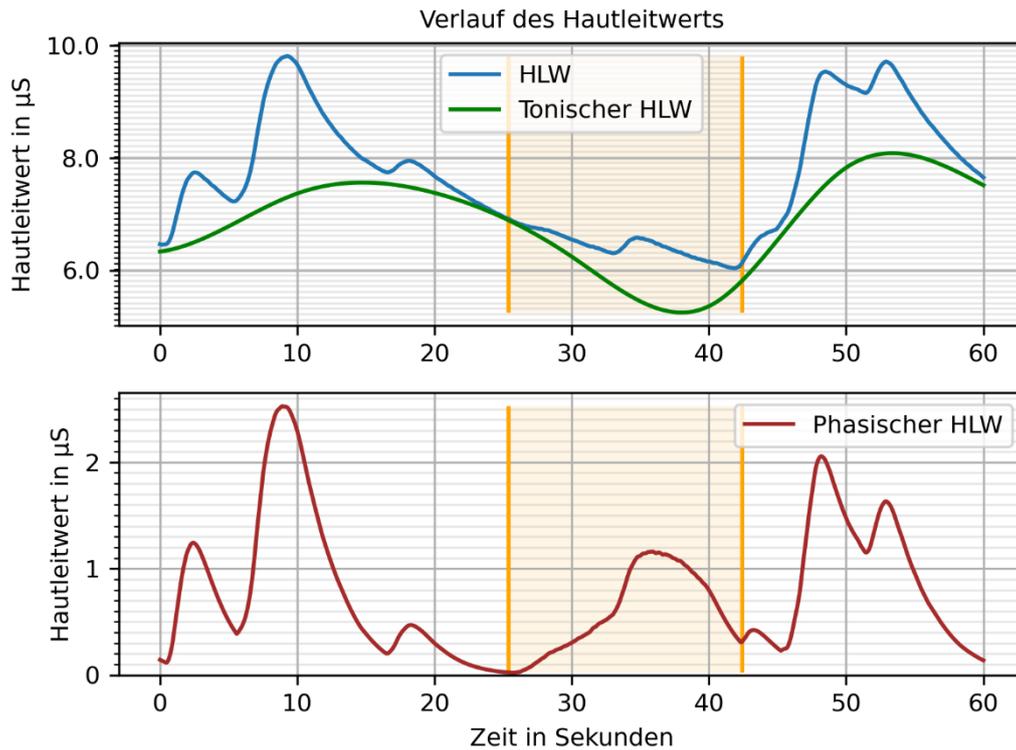


Abbildung 7.2: Ein physiologisch nicht erklärbares Unterschwingen im tonischen Maß (grün) vor dem Anstieg im HLW-Signal (blau) führt zu einer unverhältnismäßig großen HLW-Reaktion im phasischen Maß (rot). Der betreffende Bereich (orange) wird als Fehler markiert.

Signalrauschen

Wie in Abbildung 7.3 zu sehen, ragt die Amplitude der HLW-Reaktionen weniger als $0,06 \mu\text{S}$ über das umliegende tonische Maß hinaus. Das sind üblicherweise Messrauschen oder Fluktuationen. In diesem Fall kann nicht unterschieden werden, ob es sich um eine kleine HLW-Reaktion oder um Fluktuationen handelt. Deswegen werden solche Reaktionen nicht als HLW-Reaktion gezählt.

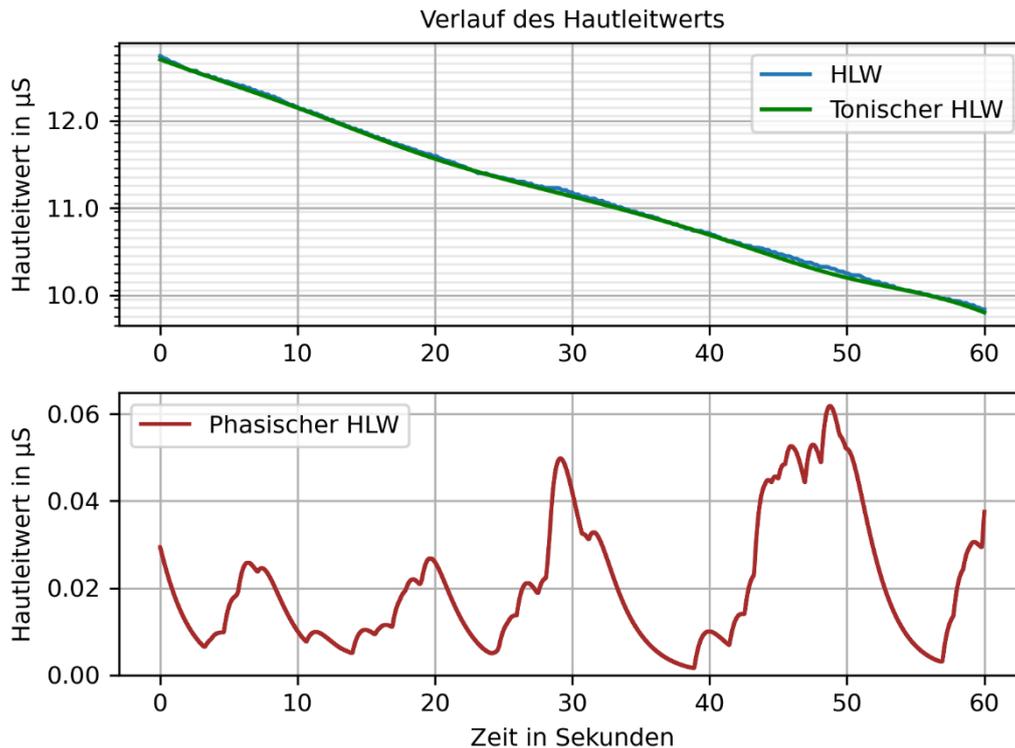


Abbildung 7.3: Die Amplitude des phasischen Maßes agiert in einem kleinen Bereich ($0,06 \mu\text{S}$). Demensprechend handelt es sich vermutlich nicht um HLW-Reaktionen, sondern um Messrauschen.

Häufigkeit von Hautleitwertreaktionen

Nach Macefield [223] feuern Schweißneuronen bei Belastung im Durchschnitt mit $0,62 \text{ Hz}$. Kurzzeitig können Schweißneuronen schneller feuern, aber nicht dauerhaft. Das Feuern der Schweißneuronen führt zu einer HLW-Reaktion. Das heißt, dass zwischen den HLW-Reaktionen üblicherweise entsprechende zeitliche Abstände liegen müssen. Bei $0,62 \text{ Hz}$ dürfte bei Belastung im Durchschnitt alle $1,61 \text{ s}$ eine HLW-Reaktion auftreten. In dieser Arbeit wird als Kriterium für valide HLW-Reaktionen festgelegt, dass mindestens 1 s zwischen dem Beginn der HLW-Reaktionen liegen muss. Dies ist angelehnt an Greco [213, S. 800], der für seine Simulationsdaten eine minimale, zeitliche Distanz von 1 s zwischen den Schweißimpulsen nutzt.

Automatische Identifizierung der Hautleitwertreaktionen

In diesem Abschnitt wird die Auswahl für den Algorithmus zum Finden der HLW-Reaktionen getroffen. Die zur Auswahl stehenden Algorithmen werden auf vorher gelabelte Daten angewendet und nach ihrer Spezifität und Sensitivität bewertet. Es wird der Algorithmus gewählt, der im Durchschnitt die höchste Übereinstimmung hat. Diese erreicht die `find_peaks`-Methode [224] mit den entsprechenden Parametern, die in dem Softwarepaket [218] hinterlegt sind.

Für das Auffinden der HLW-Reaktionen gibt es verschiedene Algorithmen. Einige davon sind in dem öffentlich zur Verfügung stehenden Softwarepaket Neurokit2 enthalten. Diese sind:

- Die `find_peaks`-Methode von SciPy [224], die als Standard bei Neurokit2 voreingestellt ist und lokale Maxima findet.
- Der Algorithmus nach Gamboa [225, S. 73ff], der eine Übertragungsfunktion parametrisiert, die auf der idealen Gestalt einer HLW-Reaktion basiert.

- Der Algorithmus nach Van Halem [226, S. 799], der ähnlich zur find_peaks-Methode nach lokalen Maxima anhand geeigneter Parameter sucht.

Für das Erstellen des Datensatzes zur Bewertung werden jeweils zehninütige Abschnitte von drei zufällig ausgewählten Personen händisch gelabelt. Dazu werden die Bereiche markiert, in denen eine HLW-Reaktion zu finden ist. Beispielhaft ist ein Auszug in Abbildung 7.4 dargestellt.

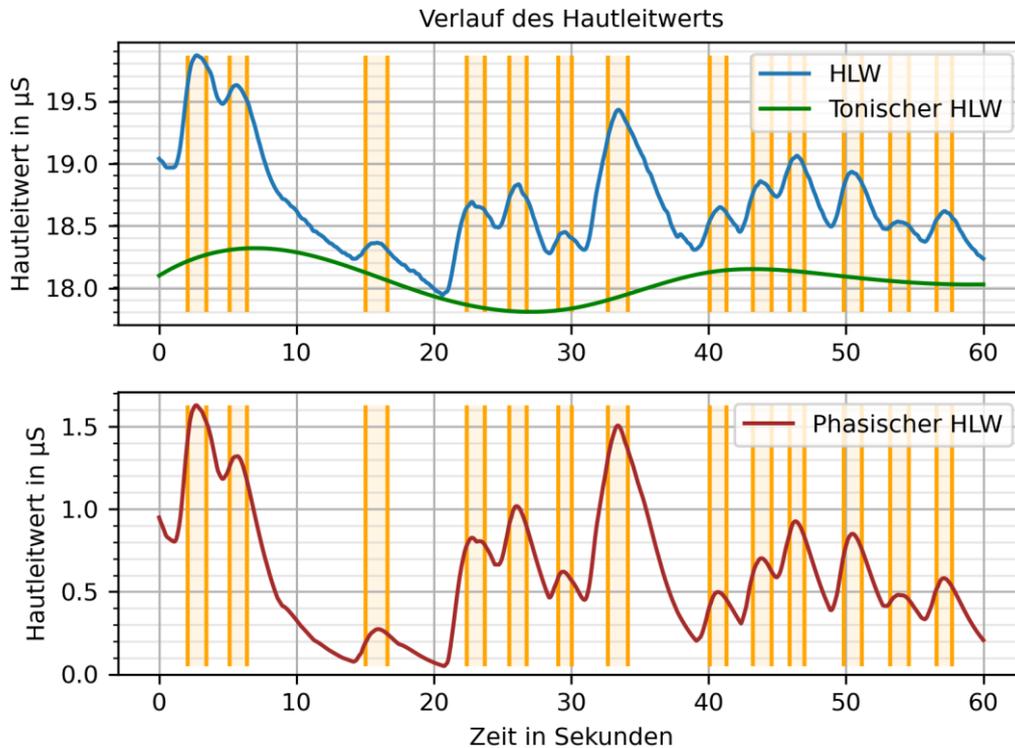


Abbildung 7.4: Die Bereiche der HLW-Reaktionen werden händisch gelabelt, um eine Baseline für den Vergleich der Methoden zum automatisierten Auffinden der HLW-Reaktionen zu haben.

Bewertet werden die Algorithmen an den Messgrößen Spezifität und Sensitivität. Die Spezifität gibt darüber Auskunft, welcher Anteil der Detektionen tatsächliche HLW-Reaktionen sind. Die Sensitivität gibt an, welcher Anteil der tatsächlichen HLW-Reaktionen vom Algorithmus detektiert wurden. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Mit einer Spezifität von 91% und einer Sensitivität von 93% erzielt die find_peaks-Methode von SciPy das beste Ergebnis.

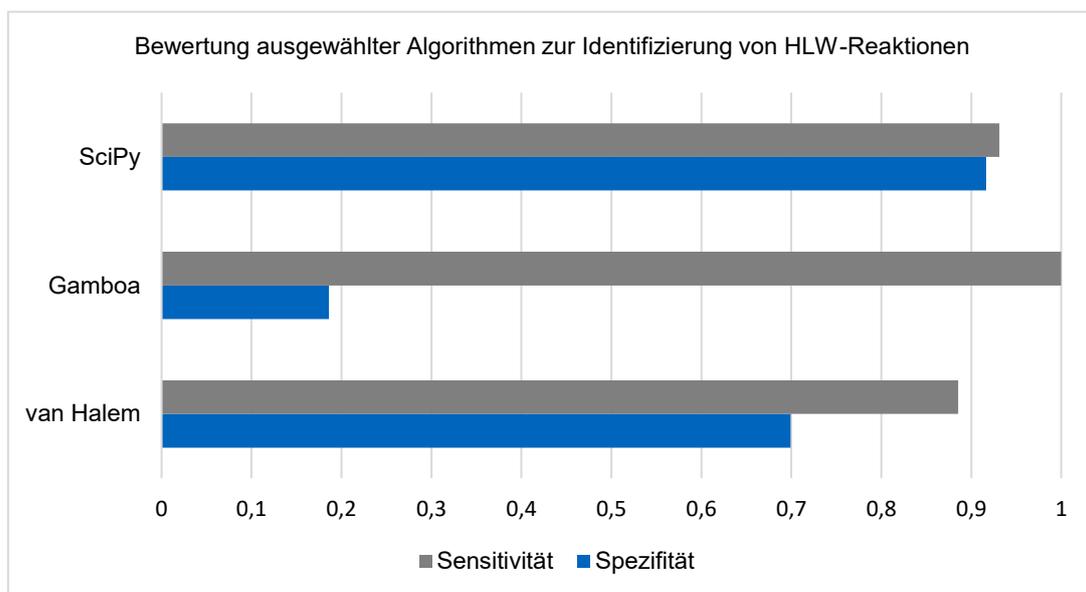


Abbildung 7.5: Vergleich der Peak-Finder anhand der Kenngrößen Sensitivität und Spezifität.

Herzratenvariabilität

Die Herzaktivitätsdatenaufbereitung folgt den Schritten der Identifizierung von R-Zacken, der Identifizierung von Artefakten und der Extraktion der validen RR-Intervalle.

Für das Auffinden der R-Zacken werden die von dem Softwarepaket Neurokit2 bereitgestellten Funktionen verwendet [227]. Weiter ist die visuelle Inspektion der EKG-Aufzeichnung sinnvoll, um Artefakte zu erkennen [134, S. 1006]. Bei EKG-Messungen entstehen Artefakte üblicherweise aufgrund von Bewegung oder Leitungsstörungen [228, S. 125]. Zur Identifizierung von Artefakten inspiziert der Autor alle Messungen. Bereiche mit ventrikulären Extrasystolen, also Herzrhythmusstörungen, werden ebenfalls ausgeschlossen, weil die HRV-Auswertung nur auf normale RR-Intervalle anwendbar ist [134, S. 1002].

Es werden drei Fälle an Artefakten unterschieden. Zum einen kann es vorkommen, dass die Software fälschlicherweise eine R-Zacke detektiert, z. B. wegen der Nähe zu einer tatsächlichen R-Zacke oder wegen Signalrauschens. Die entsprechenden R-Zacken können, wie in Abbildung 7.6 dargestellt, identifiziert und entfernt werden. Zum anderen kann die Software zum Finden der R-Zacken einzelne Zacken übersehen, obwohl diese für den menschlichen Betrachter sichtbar sind. Sollte dies der Fall sein, wird die R-Zacke händisch markiert.

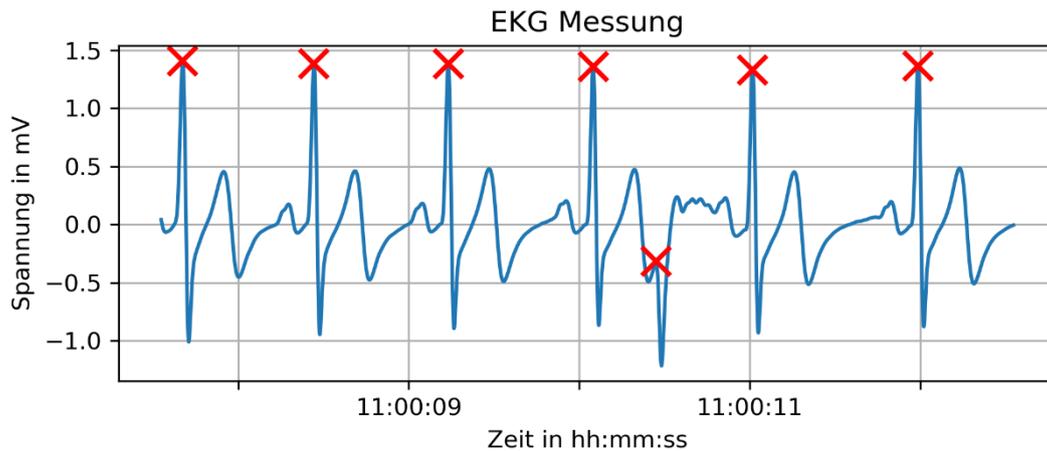


Abbildung 7.6: Ein lokales Maximum wird fehlerhaft als R-Zacke detektiert (rotes X). Dabei handelt es sich um ein Messartefakt, das entfernt wird.

Darüber hinaus kann die Software aufgrund von Signalrauschen eine R-Zacke übersehen oder ein Signal fälschlicherweise als R-Zacke detektieren. Auch der menschliche Betrachter kann in diesem Fall keine eindeutige R-Zacke definieren. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Dieser Bereich wird als Artefaktbereich markiert und von der Auswertung ausgeschlossen.

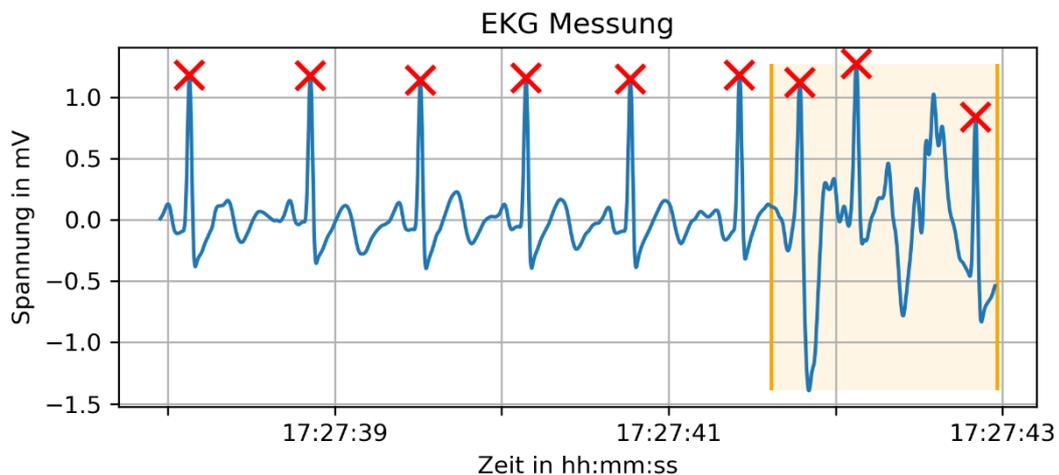


Abbildung 7.7: Der verrauschte Bereich (orange) lässt keine eindeutige Interpretation der R-Zacken zu. Der Bereich wird entsprechend gekennzeichnet.

Der Umgang mit Artefakten im EKG ist abhängig von den Kennzahlen, die anhand der EKG-Daten berechnet werden sollen. Zum einen können durch Interpolation mit Hilfe der umliegenden QRS-Komplexe fehlende R-Zacken ergänzt werden [134, S. 1006]. Zum anderen können von Artefakten betroffene Bereiche gelöscht und von den Auswertungen ausgeschlossen werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird darauf eingegangen.

Auswahl der Messgrößen

Ziel dieses Abschnittes ist es, die Auswahl der physiologischen Größen zu treffen, die in der sich anschließenden Studie ausgewertet werden. Dazu werden die Ergebnisse von Brenk [207] interpretiert, die die Eignung der zur Verfügung stehenden Messgrößen untersuchte.

Die Versuchspersonen durchliefen bei Brenk [207, S. 41] vier Fahraufgaben, mehrere Ruhephasen und den Stroop-Test [229, S. 25] als Vergleichsaufgabe. Die Fahraufgaben wurden mit der DS in dem Software-Stack für das Teleoperierte Fahren [202] und dem LGSVL Simulator [230, 231] durchgeführt. Anschließend wurden einige, übliche Messgrößen des HLW und der HRV aus den erhobenen Messdaten errechnet und bewertet, inwieweit die Messgrößen die erwartete Beanspruchung durch die Aufgaben widerspiegeln. Die vier Fahraufgaben setzen sich aus zwei Szenarien zusammen, die mit zwei unterschiedlichen Latenzzeiten durchfahren wurden; einmal ohne zusätzliche Latenzzeit und einmal mit einer zusätzlichen Latenzzeit von 300 ms. Die zu fahrende Geschwindigkeit war in beiden Latenzzeitenkonfigurationen gleich.

Der Untersuchung liegt die Annahme zu Grunde, dass die Aufgabenarten unterschiedlich beanspruchend sind. Verglichen werden die Ruhephasen mit den Aufgabenphasen und die Fahraufgaben ohne zusätzliche Latenzzeit mit den Fahraufgaben mit zusätzlicher Latenzzeit. Die Annahmen sind, dass zum einen die Beanspruchung während der Ruhephasen kleiner ist als die Beanspruchung während der Aufgabenphasen. Zum anderen, dass die Beanspruchung während der Fahraufgaben ohne zusätzliche Latenzzeit niedriger ist als die Beanspruchung während der Fahraufgaben mit zusätzlicher Latenzzeit.

Diese Annahmen wurden über die subjektive Rückmeldung der Versuchspersonen anhand der Bewertungsskala zur mentalen Anstrengung nach Eilers [232] erfragt und bestätigen die Annahmen [207, S. 48].

Am repräsentativsten sind bei der EKG-Messung die Standardabweichung der RR-Intervalle σ_{HP} und bei der HLW-Messung die Frequenz der HLW-Reaktionen f_{HR} . Die Übereinstimmung mit der erwarteten Beanspruchung ist in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 7.4: Messgrößenabhängige, prozentuale Übereinstimmung der Bestimmung der erwarteten und berechneten Beanspruchungsphasen.

Messgröße	Ruhe \leftrightarrow Aufgabe	Ohne zusätzliche Latenzzeit \leftrightarrow mit zusätzlicher Latenzzeit
σ_{HP}	94 %	75 %
f_{HR}	93 %	67 %

Die Wahl der Kennzahl beeinflusst die Handhabung der Artefakte [233]. Die Standardabweichung der RR-Intervalle ist laut Salo [233, S. 13] für kurze Zeiträume um die 5 Minuten stabil gegenüber der Verwendung der Entfernungsmethode zur Handhabung der Artefakte. Bei einer Artefaktquote von 5% liegt die Abweichung der Standardabweichung der RR-Intervalle unter 1% [233, S. 10]. Die Interpolationsmethoden nullten und ersten Grades bewirkten über die Artefaktquoten von 5, 20, 30 und 50% größere Abweichungen [233, S. 10]. Erst bei hohen Fehlerquoten von 30 % und mehr ist eine quadratische Interpolation zur Korrektur der von Artefakten betroffenen Bereichen lohnenswert [234, S. 9].

7.2.3 Subjektive Messung

In dieser Arbeit wird der DALI verwendet, weil er für Teleoperation aufgrund der automobilen Anwendung passend ist. Auf die Gewichtung der Dimensionen durch die Versuchspersonen (zweiter Schritt) wird verzichtet, weil dieser Schritt zusätzlichen Aufwand für die Versuchspersonen bedeuten würde und, wie in Abschnitt 2.4.3 aufgeführt, beim Ursprungsverfahren NASA TLX ohne Einbußen in der Aussagekraft weggelassen werden kann.

7.3 Studie zur Bewertung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

Die Überprüfung der Fragestellungen 3 und 4 erfolgt durch eine Simulatorstudie mit Versuchspersonen, die nach Abschnitt 7.1 für die Teleoperation geschult wurden.

7.3.1 Zielsetzung und Hypothesenbildung

Die Modifizierung der Wahrnehmung reduziert die objektive Arbeitsbelastung für den Operator. Der Operator sollte dies in Form einer reduzierten Beanspruchung wahrnehmen. Er hat im Vergleich zur DS weniger zu tun, weniger zu verantworten und die Flaschenhalse bei den kognitiven Ressourcen werden nach Abschnitt 6.2 besser vermieden. Es stellt sich die Frage, ob dieses theoretische Konstrukt einer Validierung standhält.

Durch die Veränderung der Steuerungsart wird in erster Linie beabsichtigt, die mentale Beanspruchung der Operatoren aufgrund einer vereinfachten Steuerung und eines kleineren Verantwortungsbereichs zu senken. Jedoch kann die Senkung der objektiven Arbeitsbelastung auch zu einer Steigerung der Monotonie führen und aufgrund von Unterbeanspruchung eine höhere mentale Beanspruchung hervorrufen [14, S. 24]. Deswegen wird folgende ungerichtete Hypothese abgeleitet.

- Hypothese 1: Die mentale Beanspruchung der Operatoren unterscheidet sich in den zu bewältigenden Szenarien zwischen den Steuerungsarten der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung und der direkten Steuerung.

Darüber hinaus hat die Entwicklung der MMW das Ziel, die Bearbeitungsdauer der Szenarien zu senken, indem sich zum einen der Operator direkt nach Überwindung des betroffenen Bereichs und damit noch während der Fahrt vom Fahrzeug trennen kann und zum anderen die automatisierte Fahrfunktion die Situation womöglich schneller als der Operator durchfährt. Jedoch kann es vorkommen, dass besonders geübte oder risikoreiche Operatoren die Situationen durchaus trotzdem schneller als die automatisierte Fahrfunktion durchfahren und lösen. Deswegen wird folgende ungerichtete Hypothese aufgestellt.

- Hypothese 2: In den zu bewältigenden Szenarien unterscheidet sich die gesamte Bearbeitungsdauer durch den Operator zwischen den Steuerungsarten der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung und der direkten Steuerung.

In der Simulatorstudie wird untersucht, ob die aus den oben formulierten Hypothesen abgeleiteten Nullhypothesen zu widerlegen oder zu bestätigen sind.

- H01: Die mentale Beanspruchung unterscheidet sich in den zu bewältigenden Szenarien nicht zwischen den beiden Steuerungsarten der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung und der direkten Steuerung.
- H02: Die Bearbeitungsdauer der Operatoren unterscheidet sich in den zu bewältigenden Szenarien nicht zwischen den beiden Steuerungsarten.

7.3.2 Experimentelles Design und Versuchsablauf

Es kommt ein Versuchsdesign mit Messwiederholung zum Einsatz, das den Vorteil einer höheren statistischen Teststärke bei gleicher Größe der Stichprobe bietet. Durch die Variation der Steuerungsart (unabhängige Variable) soll eine Veränderung der mentalen Beanspruchung und der Bearbeitungszeit (abhängige Variablen) hervorgerufen werden. Die Operationalisierung der abhängigen Variablen ist in Abschnitt 7.2 beschrieben. Die zu vergleichenden Steuerungsarten sind die DS und die MMW. Von jeder Versuchsperson werden 12 Szenarien, die in Abschnitt 7.3.4 näher beschrieben sind, mit jeder Steuerungsart je einmal behandelt.

In Abbildung 7.8 ist der Studienablauf grafisch dargestellt. Zu Beginn der Studie werden die Versuchspersonen in Form einer Folienpräsentation über den Ablauf der Studie informiert. Daraufhin frischen die Versuchspersonen ihre Kenntnisse über die Steuerungsarten auf, indem ihnen die wichtigsten Informationen erneut präsentiert werden und sie die Bedienung wiederholen. Anschließend bringen sich die Versuchspersonen die Elektroden für die Herzraten- und HLW-Messungen mit Hilfe eines Anweisungsvideos und eines Bildes selbst an. Der Studienleiter steht den Versuchspersonen für Nachfragen zur Verfügung. Nach einer Überprüfung der Signalgüte der physiologischen Messungen beginnt die Studie.

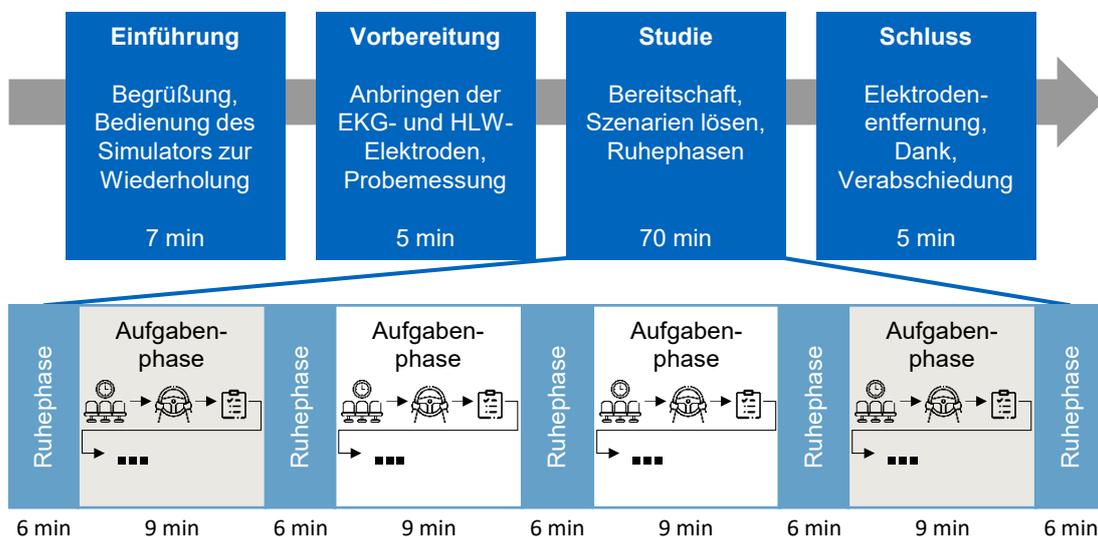


Abbildung 7.8: Übersicht über den Ablauf der Hauptstudie.

Der Verlauf soll dem Ablauf in einem zukünftigen Kontrollzentrum möglichst ähnlich sein. Wie in Abschnitt 2.2.4 dargestellt, werden die Operatoren gerufen. Sie werden versuchen, die Situationen zu lösen, und sich danach vom Fahrzeug trennen. Eine dauerhafte Überwachung wird nicht stattfinden. Dementsprechend werden die Versuchspersonen in der Studie zur Situationslösung über eine am Bildschirm erscheinende Nachricht informiert. Nach der Situationslösung trennen sie sich vom simulierten Fahrzeug.

Die in Summe 24 Szenarien werden in vier Aufgabenphasen á 6 Szenarien unterteilt. Innerhalb einer Aufgabenphase wird ausschließlich eine Steuerungsart verwendet. Die Reihenfolge der Steuerungsarten über die Aufgabenphasen folgt dem Schema A-B-B-A. Dadurch werden die notwendigen Steuerungsartenwechsel reduziert. Außerdem durchlaufen die Versuchspersonen mit beiden Steuerungsarten Szenarien zum ersten Mal, bevor sie diese mit der anderen Steuerungsart wiederholen. Die erste zu bedienende Steuerungsart ist über die Versuchspersonen hinweg randomisiert, wie auch die Reihenfolge der Szenarien innerhalb einer Aufgabenphase. Für die Bearbeitung einer Aufgabenphase werden ca. 9 Minuten veranschlagt. Nach jeder Aufgabe wird ein DALI-Fragebogen ausgefüllt. Zwischen den Aufgaben innerhalb einer Aufgabenphase sind Pausen von ca. 30 Sekunden eingeplant, bevor die nächste Aufforderung zur Situationslösung erscheint. Die Beanspruchung kann in diesem Zeitraum wieder auf das Ausgangsniveau sinken. Zwischen den Aufgabenphasen findet eine Ruhephase von ca. 6 Minuten aus zwei Gründen statt. Zum einen erholen sich die Versuchspersonen von den vorherigen Aufgaben. Zum anderen kann bei einem Wechsel der Steuerungsart das Eingabegerät (Lenkrad oder Maus und Tastatur) zwischen den Aufgabenphasen getauscht werden, ohne dass relevante Messbereiche durch die Bewegungen beeinflusst werden.

Während der Studie wird auf Zeitdruck verzichtet. Die Versuchspersonen können sich zur Lösung der Situation so viel Zeit nehmen, wie sie benötigen. Von den Operatoren wird zwar in Zukunft erwartet werden, innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne bestimmte Fälle lösen zu können, sodass diese zeitlich bedingtem Stress ausgesetzt sein werden. Jedoch wird den Versuchspersonen kein Zeitdruck auferlegt, weil nicht das absolute Stresslevel der Versuchspersonen von Interesse ist, sondern die Unterschiede im Stressniveau zwischen den Steuerungsarten. Zudem würde Zeitdruck das Auftreten von Flüchtighkeitsfehlern fördern, wodurch die Anzahl an verwertbaren Situationen und somit die Aussagekraft der Studie reduziert werden könnte.

Die Studie wird mit einem positiven Ethikvotum (187/21 S) durchgeführt, das von der Ethikkommission der Technischen Universität München ausgestellt wurde.

7.3.3 Versuchsaufbau

Die Studie findet an einem statischen Operatorarbeitsplatz statt (Abbildung 7.9). Über drei 32 Zoll Curved Gaming Monitore [235] werden dem Operator die zur Steuerung benötigten Informationen visualisiert. Die Monitore haben aufgrund ihrer Bildwiederholfrequenz von 165 Hz und einer minimalen Pixelreaktionszeit von 4 ms eine niedrige Latenzzeit von unter 15 ms [236]. Das Lenkrad und die Pedale von der Serie Fanatec ClubSport (ClubSport Lenkradkranz GT Forza, ClubSport Universal Hub, ClubSport Wheel Base V2.5 und ClubSport Pedals V3) erlauben ein präzises Steuern des Fahrzeugs. Der Operator wählt über Tastatur und Maus die Steuerungsart und die Visualisierungseinstellungen.



Abbildung 7.9: Operatorarbeitsplatz

Der Aufbau besteht aus zwei Desktop-PC mit Ubuntu 18.04. Einer der beiden Desktop-PC betreibt den Operatorarbeitsplatz, auf dem die Operatorseite der Software des teleoperierten Fahrens verwendet wird [202]. Auf dem anderen Desktop-PC, der vom Studienleiter benutzt und im Weiteren als Simulations-PC bezeichnet wird, laufen die Fahrzeugseite der Software des Teleoperierten Fahrens und eine Simulationsumgebung. Als Simulationsumgebung kommt die Open-Source Software LGSVL in der Version 2020.06 zum Einsatz [230, 231], die auf der Game Engine Unity basiert [237].

Die Simulationsumgebung ist rechenintensiv und lastet den Simulations-PC bis an seine Leistungsgrenze aus. Deswegen werden die den Operatoren zur Verfügung gestellten Kameras auf eine Hauptfrontkamera und drei Weitwinkelkameras reduziert, die die nahe Umgebung vorderhalb und seitlich des Fahrzeugs wiedergeben, siehe Abbildung 6.3. Die Hauptkamera hat eine Auflösung von 1200x900 Pixel und wird mit 40 Hz betrieben. Die drei Weitwinkelkameras haben jeweils eine Auflösung von 800x600 Pixel und werden ebenfalls mit 40 Hz betrieben. Die Videosstreams werden mit dem x264enc GStreamer-Package komprimiert [238], der die Videos in H264-komprimierte Daten kodiert, und haben jeweils eine Bitrate von 1000 kBit/s.

Außerdem führt die Auslastung des Simulations-PC zu einer oszillierenden Gesamtlatenzzeit, die der Gesamtlatenzzeit eines realen Systems ähnelt und deren Messwerte in Abbildung 7.10 dargestellt sind. Gemessen wird die Gesamtlatenzzeit des Lenkradwinkels anhand der zeitlichen Differenz zwischen der Operatoreingabe und der erhaltenen, operatorseitigen Lenkwinkelreaktion des Fahrzeugs. Der Median dieser Latenzzeit liegt im Simulationssetup bei 201 Millisekunden. Diese Werte bilden die tatsächlichen Latenzzeiten eines realen, teleoperierten Fahrzeugs ausreichend gut ab. Unter guten Bedingungen misst Georg [79, S. 6] für die minimale, durchschnittliche Gesamtlatenz eines realen, teleoperierten Fahrzeugs 190,35 Millisekunden Gesamtlatenzzeit.

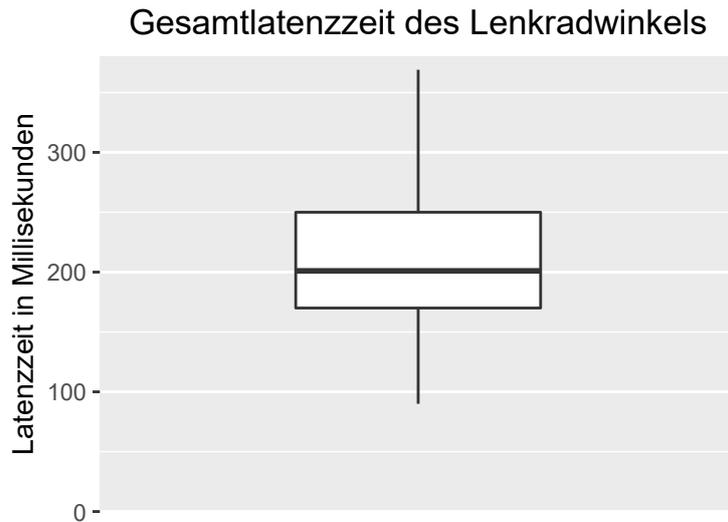


Abbildung 7.10: Gesamtlatenzzeit des Lenkradwinkels des Studienaufbaus anhand der zeitlichen Differenz zwischen Operatorlenkradwinkleingabe und erhaltener, operatorseitiger Lenkwinkelreaktion des Fahrzeugs.

7.3.4 Versuchsszenarien

Die Szenarien werden möglichst realitätsnah in Bezug auf die zu erwartete Anwendung einer Leitwarte gewählt. Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, werden die Operatoren zur Unterstützung und zur Behebung von Problemen bei der Weiterfahrt aufgefordert werden. Sie schalten sich zu, beheben die Situation, wenn möglich, und trennen sich anschließend wieder vom Fahrzeug. Es werden ausschließlich innerstädtische Szenarien ausgewählt. Eine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern kann dabei auftreten. Die gewählten Szenarien werden entsprechend des Ebenenmodells von Bagschik [239] kategorisiert. Die erste Ebene beinhaltet die Straßengeometrie, -topologie und -markierungen. Es werden drei verschiedene Straßengeometrieausprägungen erstellt, die in Abbildung 7.11 dargestellt sind. Es handelt sich um eine gerade Straße, eine beginnende Linkskurve und eine Rechtskurve. Die Fahrbahnmarkierungen wechseln in den Szenarien zwischen einem Fußgängerüberweg und keiner Markierung. Die zweite und dritte Ebene nach Bagschik [239] enthält Verkehrszeichen und zeitliche Veränderungen der vorherigen Ebenen. Darin werden keine Veränderungen vorgenommen.



Abbildung 7.11: Darstellung der drei unterschiedlichen Straßen- und Infrastrukturszenen. Links: Gerade Straße, Mitte: beginnende Linkskurve, Rechts: Rechtskurve.

Aus den drei Straßengeometriemodellen werden in Summe 12 unterschiedliche Szenarien erstellt, indem die Art und Anzahl der Verkehrsteilnehmer, deren Verhalten und die als hinderlich

detektierten Objekte variiert werden. Das sind Veränderungen auf der vierten Ebene nach Bag-schik [239]. In der fünften Ebene befänden sich Wetter- und Temperaturveränderungen. Diese treten in den Szenarien bewusst nicht auf, weil die Operatoren, wie im Stand der Technik 2.2.4 aufgeführt, für ein bestimmtes Gebiet verantwortlich sein werden. Innerhalb der Versuchszeit von einer Stunde sind häufige Wetterveränderungen in der gleichen Region unrealistisch. Die Szenarien sind derart gestaltet, dass eine Umfahrung des erkannten Hindernisses nicht möglich ist, ohne die Straße zu verlassen.

In Abbildung 7.12 sind die Objekte dargestellt, die als nicht überfahrbar eingestuft sind. Es handelt sich um einen Müllsack, ein Paket, eine Absperrung aus Leitkegel und einen Kanister.



Abbildung 7.12: Nicht überfahrbare Hindernisse, die nicht innerhalb der Straße überfahren werden können. Links oben: Müllsack, Mitte oben: Paket, Rechts oben: Absperrung aus Leitkegeln, unten: Kanister vor dem Egofahrzeug.

Einige Objekte, die von der automatisierten Wahrnehmung fälschlicherweise als hinderlich erkannt werden, sind in Abbildung 7.13 aufgeführt. Diese sind Zeitungen, Dosen, ein Kanaldeckel, Handschuhe, Laub, eine Papiertüte und Falsch-Positiv-Auslösungen ohne ein erkennbares physisches Objekt.

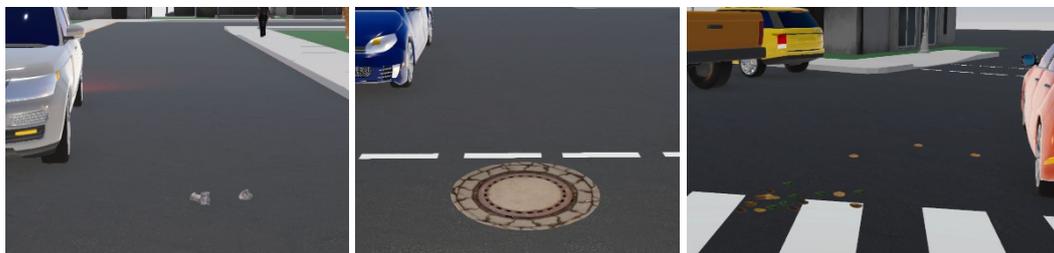


Abbildung 7.13: Von der automatisierten Wahrnehmung fälschlicherweise als Hindernis detektiert. Links: Dosen, Mitte: Kanaldeckel, Rechts: Zerstreutes Laub.

7.3.5 Probandenvorbereitung und -kollektiv

An der Studie nehmen 34 Personen im Alter von 19 bis 43 Jahren ($M = 24,4$; $SD = 3,9$) teil. Vier davon sind weiblich, 30 männlich. Die meisten Versuchspersonen (22) hatten bislang nicht an

einer Fahrsimulatorstudie teilgenommen. Die in Abbildung 7.14 dargestellten Verteilungen beschreiben das Probandenkollektiv. Die Versuchspersonen betrachten ihren Fahrstil eher als sportlich, wohingegen keine Person einen aggressiven Fahrstil angab.

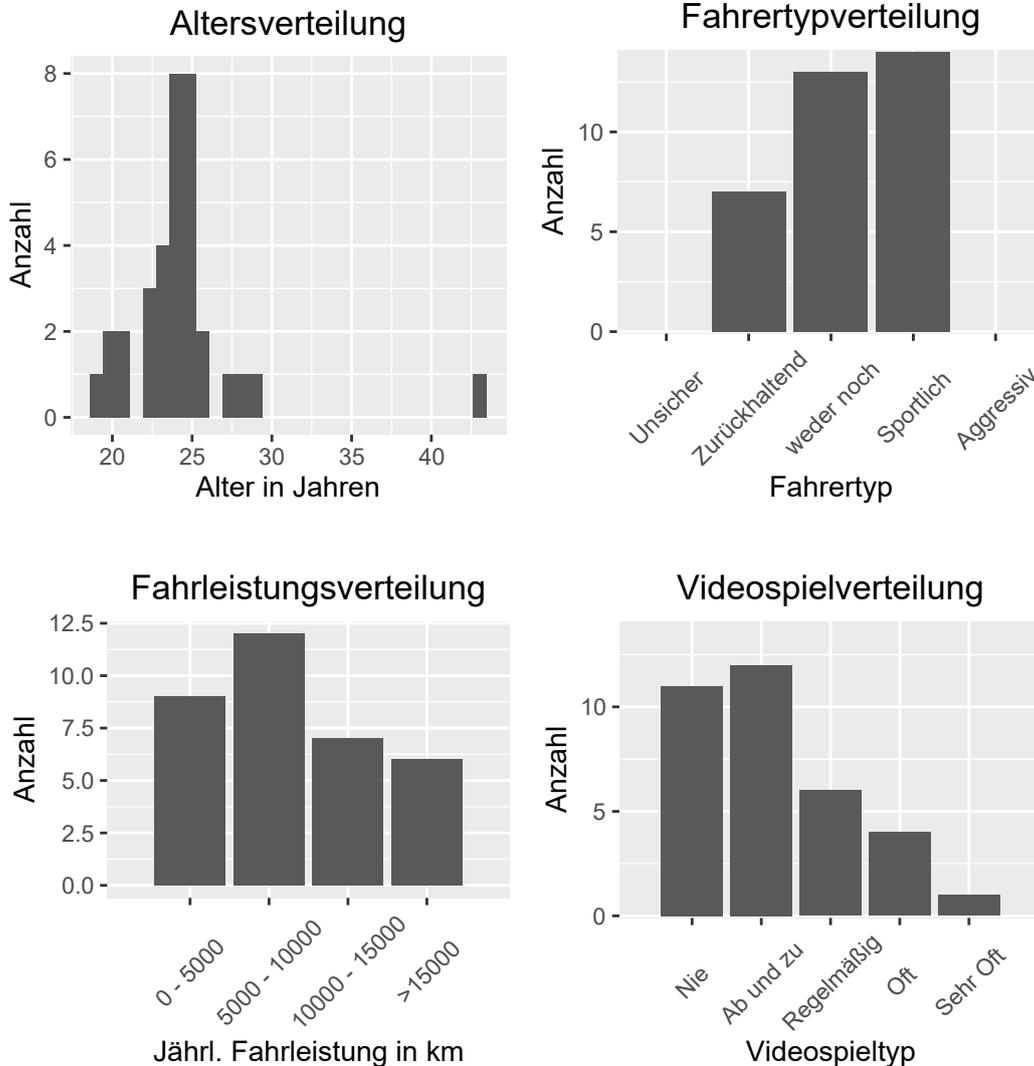


Abbildung 7.14: Probandenkollektiv

Während der Schulung konnten die Versuchspersonen ihre Fähigkeiten zur Bedienung der Te- leoperation deutlich verbessern. Ausschlaggebend für die Leistungsbewertung bei der DS ist das Szenario 4 aus Termin 2, weil es den Szenarien der Studie ähnelt und anspruchsvoll ist. Die Versuchspersonen manövrieren dabei durch zwei enge Tore, die aus Schaumstoffwürfeln auf- gebaut und in Fahrtrichtung versetzt angeordnet sind. Die Versuchspersonen absolvierten dieses Szenario zweimal in der Simulation und anschließend zweimal mit dem Realfahrzeug. In der Abbildung 7.15 ist die entsprechende Lernkurve dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich über die Wiederholungen die Anzahl der Kollisionen deutlich reduzierten. Beim vierten Ver- suchsdurchlauf hatte nur eine Person einen Zusammenstoß mit dem Hindernis (Schaumstoff- würfel), eine weitere Person streifte es.

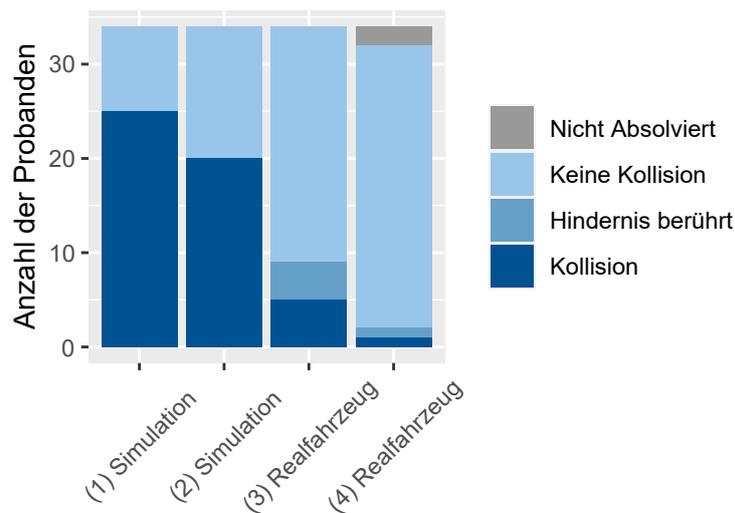


Abbildung 7.15: Lernkurve der DS während der Schulung in Termin 2. Die Versuchspersonen führen das gleiche Szenario zweimal in der Simulation und zweimal mit dem Realfahrzeug in der gezeigten Reihenfolge.

7.3.6 Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt werden die Entscheidungen der Versuchspersonen in den Szenarien aufgeführt, die zeitlichen Intervalle vorgestellt und im Besonderen die Datenqualität vorgestellt.

Häufigkeit und Umgang mit Fehlentscheidungen

Die Vierfeldertafel in Tabelle 7.5 zeigt die Anzahl der korrekten und falschen Entscheidungen der Versuchspersonen. Ein Szenario zählt als freigegeben, wenn das Fahrzeug im Anschluss an die Operatoreingabe eine Szenario-abhängige Mindestdistanz zurücklegt (ungefähr 1 Meter). Dadurch wird vermieden, dass abgebrochene Freigaben fälschlicherweise gezählt werden.

Tabelle 7.5: Vierfeldertafel zum Entscheidungsverhalten der Operatoren. In Klammern ist die Anzahl entsprechend der Steuerungsarten (DS/MMW) aufgegliedert.

	Lösbar	Nicht lösbar	Σ
Weiterfahrt freigegeben	524 (262/262)	2 (0/2)	526 (262/264)
Weiterfahrt nicht freigegeben	20 (10/10)	270 (136/134)	290 (146/144)
Σ	544 (272/272)	272 (136/136)	816 (408/408)

In den 10 Fällen der nicht freigegebenen, aber möglichen Weiterfahrt bei der MMW sind drei Fälle, in denen die Operatoren eine Freigabe beabsichtigten, aber aufgrund einer fehlerhaften Bedienung dem Fahrzeug keine Weiterfahrt ermöglicht haben.

In Summe liegen 22 Fehlentscheidungen vor. Für die Berechnung der physiologischen Messungen und der darauf basierenden Auswertungen wird nicht zwischen lösbaeren und nicht-lösbaeren Szenarien bzw. richtig und fehlerhaft freigegebenen Szenarien unterschieden, weil die physiologischen Kenngrößen aus dem kompletten Aufgabenzeitbereich gebildet werden müssen und

keine zeitlichen Abschnitte separiert werden können, ohne die physiologischen Kenngrößen zu verfälschen. Für die Situationslösedauern werden nur richtig gelöste Szenarien berücksichtigt.

Zeitliche Intervalle

Die Interaktionen der Versuchspersonen mit der Operatorsoftware werden geloggt. Das umfasst zum Beispiel die Klicks zum Verbindungsaufbau, Start der Teleoperation oder zur Trennung der Verbindung. Die Zeitstempel werden für die jeweiligen Aufgaben daraus ausgelesen.

In Abbildung 7.16 ist die Verteilung der Situationslösedauern je Szenario dargestellt. Es ist erkennbar, dass nur ein geringer Anteil der Szenarien länger als die für die Berechnung der Standardabweichung der RR-Intervalle geforderten 60 Sekunden dauert, die in Abschnitt 2.4.3 beschrieben sind. Folglich können die physiologischen Größen nicht aufgabenspezifisch berechnet werden.

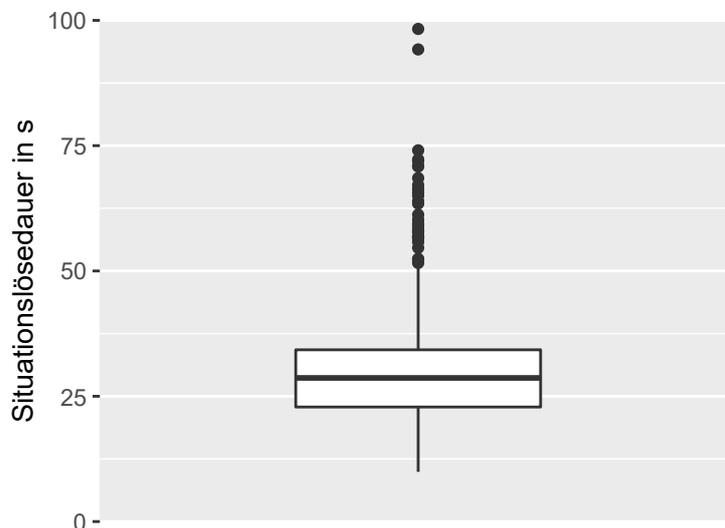


Abbildung 7.16: Verteilung der Situationslösedauer in den lösbaren und gelösten Szenarien

Wie in Abschnitt 7.3.2 beschrieben, sind für die Aufgabenphasen, die aus 6 Szenarien bestehen, ca. 9 Minuten veranschlagt. Die Aufgabenphasen dauern bei allen Versuchspersonen länger als 120 Sekunden. Dementsprechend werden die physiologischen Größen jeder Versuchsperson pro Aufgabenphase berechnet und anschließend je Steuerungsart gemittelt.

Hautleitwertmessungen

Die HLW-Daten werden, wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben, gefiltert, in phasisch und tonisch aufgeteilt, visuell inspiziert und von den mit Artefakten betroffenen Bereichen gereinigt. In Abbildung 7.17 ist die Anzahl der Versuchspersonen entsprechend ihrer Artefaktquoten dargestellt. Bei einer Versuchsperson müssen 33,7 % der Messungen ausgeschlossen werden, weil der HLW den messbaren Bereich überschritt. Diese Versuchsperson wird für Auswertungen, die die HLW-Messung einschließen, nicht berücksichtigt. Ohne diese Versuchsperson liegt der Durchschnitt des Anteils der Artefakte bei 3,5 % und der Median bei 2,6 %.

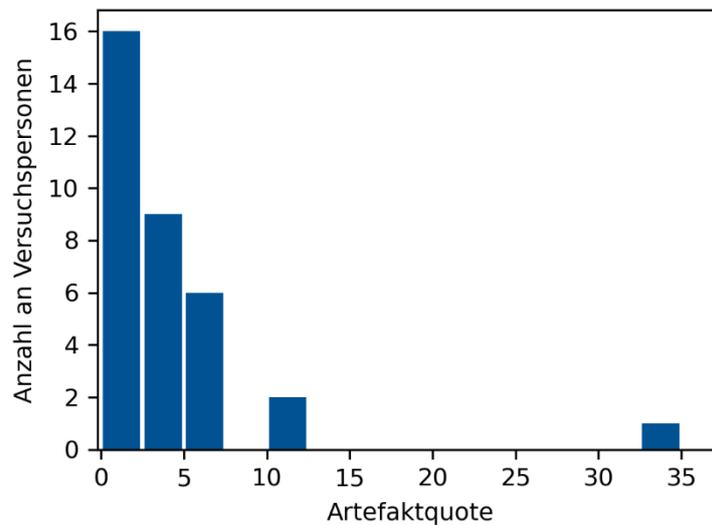


Abbildung 7.17: Häufigkeitsverteilung der Artefaktquote für die HLW-Messung

Herzratenvariabilitätsmessungen

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Setting handelt es sich nicht um ein ambulantes Setting (Armbanduhr), sondern um ein Laborsetting mit aufgeklebten Elektroden und geringer Bewegung der Versuchspersonen. Demzufolge wird erwartet, dass die Artefaktquote höchstens einen Anteil im einstelligen Prozentbereich hat. Die Auswertung der visuellen Inspektion ergibt, dass die durchschnittliche Artefaktquote bei 0,46 % und der Median bei 0,00 % liegt. Die maximale Artefaktquote an dem gesamten Aufgabenbereich einer Versuchsperson beträgt 7,70 %. Damit ist die Artefaktquote gering und die Entfernungsmethode, wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben, die passende Wahl zur Korrektur der Daten, um die Standardabweichung der RR-Intervalle σ_{HP} zu bestimmen

Zu der sich anschließenden, statistischen Auswertung wird die Standardabweichung der RR-Intervalle σ_{HP} berechnet. Dafür werden nach Shaffer [134, S. 1002] nur Intervalle zwischen normalen Herzschlägen herangezogen und Extrasystolen ausgeschlossen. Bei der Versuchsperson mit der größten Artefaktquote werden regelmäßig wiederkehrende Extrasystolen ausgeschlossen. Die Versuchsperson kann aufgrund des niedrigen Gesamtanteils an Artefakten dennoch zur statistischen Auswertung eingeschlossen werden. Aufgrund der niedrigen Artefaktquote der Herzratenvariabilität können somit alle verfügbaren Versuchspersonen für die Auswertung eingeschlossen werden.

DALI

Die Versuchspersonen füllen nach jedem Szenario einen Fragebogen aus, der anschließend digitalisiert wird. Versuchspersonen mit nicht vollständig ausgefüllten Fragebögen werden ausgeschlossen. Dies führt zum Ausschluss der Daten einer Versuchsperson von den Auswertungen. Pro Szenario wird der Mittelwert aus allen Dimensionen des DALI gebildet (raw DALI).

7.3.7 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie präsentiert. Dazu werden die statistischen Methoden zur Hypothesentestung angewendet.

Reduktion der mentalen Beanspruchung

Zur Untersuchung der in Abschnitt 7.3.1 aufgeführten Nullhypothese H_{01} wird eine einfaktorielle, multivariate Varianzanalyse (MANOVA) mit Messwiederholung durchgeführt. Die abhängigen Variablen sind die subjektiven Rückmeldungen aus dem Fragebogen DALI, die Frequenz der HLW-Reaktionen f_{HR} und die Standardabweichung der RR-Intervalle σ_{HP} . Es wird pro Versuchsperson jeweils der Mittelwert der Größen pro Steuerungsart gebildet. Von den insgesamt 34 Versuchspersonen können 31 zur statistischen Auswertung herangezogen werden. Zwei Versuchspersonen müssen wie in Abschnitt 7.3.6 beschrieben aufgrund der mangelnden Datenqualität ausgeschlossen werden. Eine weitere Person wird als extremer Ausreißer in den DALI-Werten ausgeschlossen. Die Überprüfung der Voraussetzungen für die MANOVA mit Messwiederholung findet sich in Anhang B.

Die einfaktorielle MANOVA mit Messwiederholung zeigt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Steuerungsarten für die kombinierten abhängigen Variablen, $F(1, 30) = 13,352$, $p < 0,001$ ($1,354 \cdot 10^{-5}$), multivariates $\eta^2 = 0,26$, Wilk's $\Lambda = 0,411$, Pillai = 0,589. Die Hypothesentestung erfolgt zweiseitig, weil es aufgrund der im Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Theorie der Unterbeanspruchung zu einer Steigerung der mentalen Beanspruchung kommen könnte. Gemäß dem multivariaten Eta-Quadrat [187, S. 318] besteht ein sehr großer Effekt nach Cohen [240, S. 283] zwischen den Steuerungsarten. Das deutet auf einen deutlichen Unterschied der abhängigen Variablen hin, der durch die Variation der Steuerungsart ausgelöst wird.

Für die Feststellung, welche Steuerungsart die geringere mentale Beanspruchung hervorruft, genügt die deskriptive Statistik, die in Tabelle 7.6 dargestellt ist.

Tabelle 7.6: Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen

Kenngroße	d_{DS}	d_{MMW}	$f_{HR, DS}$	$f_{HR, MMW}$	$\sigma_{HP, DS}$	$\sigma_{HP, MMW}$
Mittelwert	28,05	20,76	$6,68 \frac{1}{min}$	$6,18 \frac{1}{min}$	66,51	68,42
Median	29,58	21,25	$7,14 \frac{1}{min}$	$6,37 \frac{1}{min}$	64,45	65,37

Die Werte lassen darauf schließen, dass die mentale Beanspruchung bei der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung niedriger ist als bei der DS. Dazu sind in Abbildung 7.18 die Mittelwerte der einzelnen Messgrößen über die beiden Steuerungsarten in Boxplots dargestellt. Die mittlere, subjektive Beanspruchung aus dem Fragebogen DALI ist bei der MMW niedriger als bei der DS. Die mittlere Frequenz der HLW-Reaktionen ist bei der MMW niedriger als bei der DS. Die mittlere Standardabweichung der RR-Intervalle ist bei der MMW höher als bei der DS. Alle Kenngroßen deuten auf eine Senkung der mentalen Beanspruchung aufgrund des Steuerungsartenwechsels zu der MMW hin.

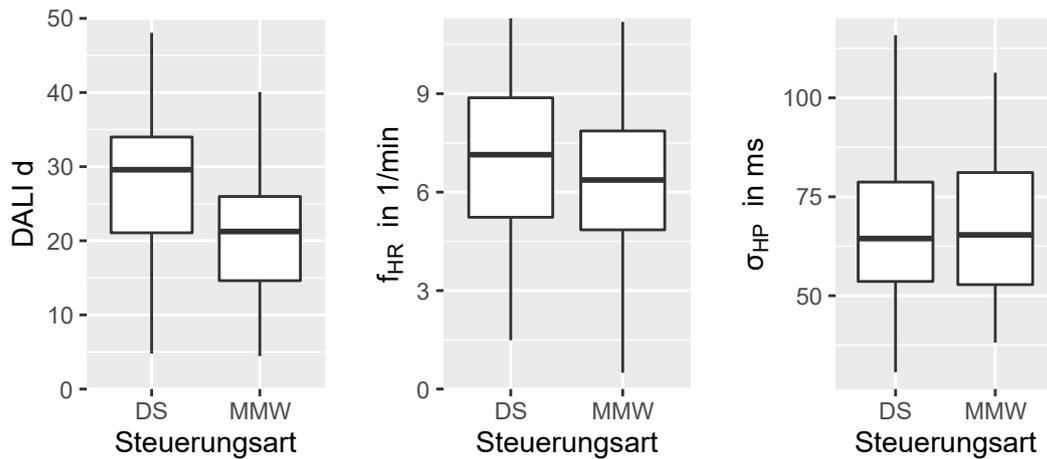


Abbildung 7.18: Visualisierung der abhängigen Variablen als Boxplot zwischen den jeweiligen Steuerungsarten. Links: DALI, Mitte: Frequenz der HLW-Reaktionen, Rechts: Standardabweichung der RR-Intervalle.

Auf Basis dieser Analysen wird die Hypothese 1 angenommen.

- Hypothese 1: Die mentale Beanspruchung der Operatoren unterscheidet sich in den zu bewältigenden Szenarien zwischen den Steuerungsarten der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung und der direkten Steuerung. ✓

Die mentale Beanspruchung ist gemäß den Auswertungen dieser Studie bei der MMW niedriger als bei der DS.

Reduktion der Situationslösedauer

In diesem Abschnitt wird die Nullhypothese H02 geprüft, die besagt, dass kein Unterschied zwischen den Steuerungsarten hinsichtlich der Situationslösedauer vorliegt. Als Situationslösedauer wird das zeitliche Intervall verstanden, das vom Verbindungsaufbau des Operators zum Fahrzeug bis zur Verbindungstrennung verstreicht. Bewertet werden nur die von den Operatoren gelösten und lösbaren Situationen.

Die Untersuchung erfolgt anhand des gepaarten t-Tests. Die Voraussetzungen werden von den Daten erfüllt. Deren Berechnung ist in Anhang C aufgeführt. Der t-Test ergibt, dass die Situationslösedauern bei der MMW signifikant niedriger sind als die Situationslösedauern bei der DS, $t(33) = 4,054$, $p = 0,001$. In Abbildung 7.19 sind die Situationslösedauern als Boxplot veranschaulicht.

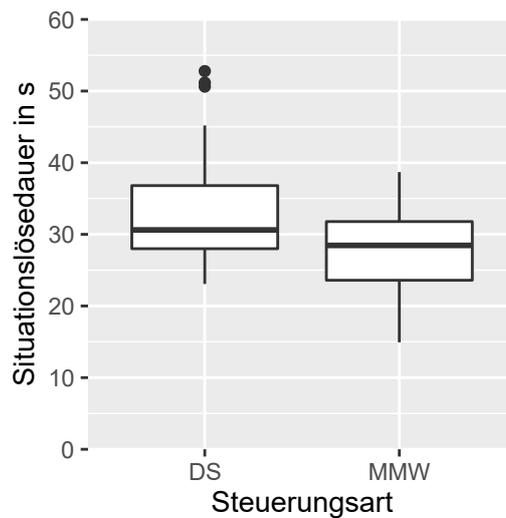


Abbildung 7.19: Boxplot der durchschnittlichen Situationslösedauern der Versuchspersonen abhängig von der Steuerungsart für die gelösten und lösbaren Szenarien.

Die Situationslösedauer bei der MMW ist im Durchschnitt niedriger als bei der DS. Im Durchschnitt unterscheidet sie sich um ca. 4 Sekunden von 33,21 Sekunden bei der DS auf 28,31 Sekunden bei der MMW. Das entspricht einer Reduktion von 14,7 %. Der Median ändert sich von 30,6 Sekunden auf 28,5 Sekunden. Folglich wird die Hypothese 2 angenommen.

- Hypothese 2: In den zu bewältigenden Szenarien unterscheidet sich die gesamte Bearbeitungsdauer durch den Operator zwischen den Steuerungsarten der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung und der direkten Steuerung. ✓

Zusätzlich zur Situationslösedauer ist nun eine absolute Dauer für die Problemlösung bekannt. In Summe werden ungefähr 30 Sekunden benötigt. Diese Dauer setzt sich aus den zeitlichen Abschnitten der Annahme der Anfrage, der Entscheidungsfindung und der Ausführung zusammen. Die zeitlichen Abschnitte sind in Abbildung 7.20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die wesentliche Zeitersparnis im Abschnitt der Ausführung entsteht. Die Operatoren können sich bereits während der Fahrt vom Fahrzeug trennen, sobald der freigegebene Bereich überfahren ist. Eine Übergabe von Teleoperation zur Automation kann bei der MMW während der Fahrt stattfinden. Bei der DS übergeben die Operatoren die Steuerung im Stillstand zurück an das Fahrzeug. Die zeitlichen Abschnitte der Annahme und Entscheidungsfindung unterscheiden sich in ihren absoluten Werten kaum voneinander.

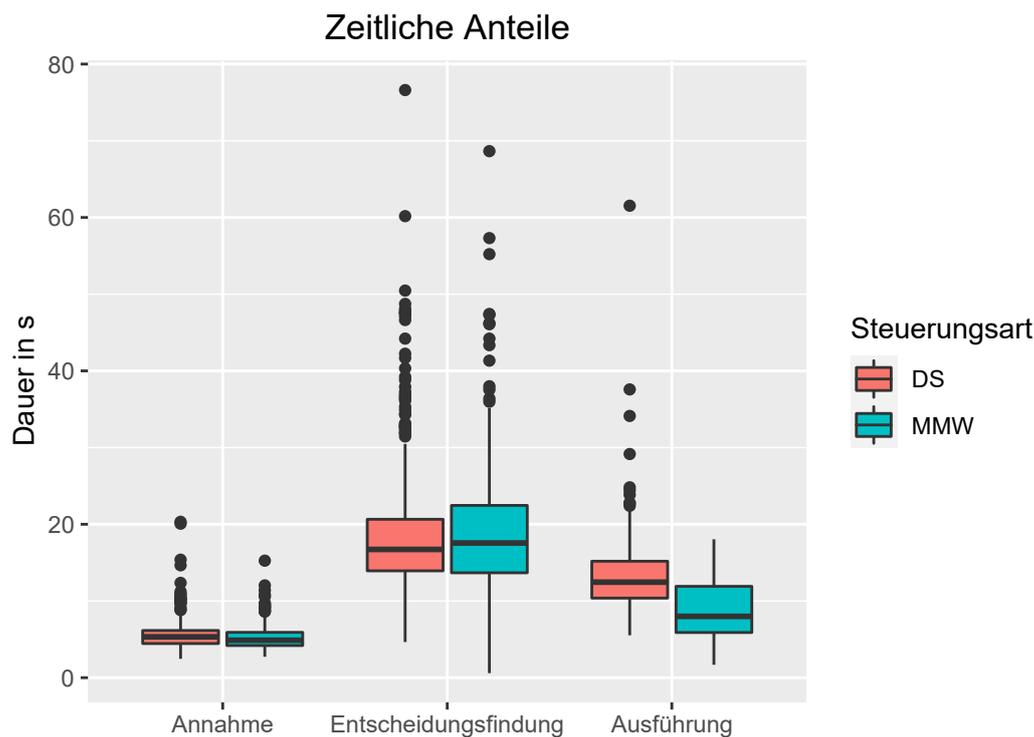


Abbildung 7.20: Aufschlüsselung der zeitlichen Anteile während der Situationslösung.

Szenarieninduzierter Beanspruchungsunterschied

In diesem Abschnitt wird anhand statistischer Methoden untersucht, ob sich die Beanspruchung bei den einzelnen Szenarien unterscheidet. Bei der Erstellung der Szenarien wurde darauf geachtet, dass die Szenarien möglichst realitätsnah sind. Die Szenarien sind sich bezüglich der Umgebung ähnlich (innerstädtisch) und den Wetterbedingungen identisch. Anhand von drei Straßengeometrien (gerade Straße (a), beginnende Linkskurve (b) und Rechtskurve (c)), siehe Abschnitt 7.3.4, wurden die Szenarien aufgebaut. Es wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit den unabhängigen Variablen der Steuerungsart (DS, MMW) und der Straßengeometrie (a, b, c) durchgeführt. Als abhängige Variable werden die DALI-Werte herangezogen. Die physiologischen Größen können hierfür nicht verwendet werden, weil die Intervalle für die Bestimmung der Kenngrößen, wie in Abschnitt 7.3.6 beschrieben, zu kurz sind. Weil in den DALI-Werten die Voraussetzung der Sphärizität nach Mauchly's Test für die Straßengeometrie verletzt ist, wird die Greenhouse-Geisser-Korrektur angewendet. Die Straßengeometrie hat demnach einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Beanspruchung ($p < 0,001$). Ein nach Holm korrigierter, paarweiser t-Test zeigt, dass zwischen der Straßengeometrie (a) und (b) kein statistisch signifikanter Unterschied vorliegt ($p = 0,19$), jedoch zwischen (a) und (c) ($p < 0,001$) und zwischen (b) und (c) ($p < 0,001$).

Univariate Beanspruchungsanalyse

Vorbereitend für die sich anschließenden Interpretationen werden im Folgenden univariate Beanspruchungsanalysen durchgeführt, um festzustellen, inwieweit der Beanspruchungsunterschied auch nur mit den einzelnen abhängigen Variablen detektiert worden wäre. Dazu werden

univariate, statistische Methoden angewandt und die Datengrundlage anschließend grafisch aufbereitet.

Es werden ein gepaarter t-Test und zwei ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt, deren Fehlerwahrscheinlichkeiten 1. Art nach Holm [241] korrigiert werden. Die Überprüfung der Voraussetzungen für die statistischen Tests finden sich in Anhang E. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 7.7: Teststatistiken der Post-Hoc Tests (gepaarte t-Tests)

Messgröße	p	p korrigiert nach Holm [241]	p<0,05
DALI	0,0000245	0,0000735	*
Frequenz der HLW-Reaktionen	0,0468	0,0936	
Standardabweichung der RR-Intervalle	0,0826	0,1652	

Der Tabelle 7.7 zufolge sind die DALI-Werte in der univariaten Betrachtung statistisch signifikant, wohingegen die Frequenz der HLW-Reaktionen und die Standardabweichung der RR-Intervalle nicht statistisch signifikant sind. Diese Zusammenhänge werden im Folgenden mittels einer relativen Betrachtung grafisch aufbereitet.

Zunächst werden die Werte des DALI betrachtet. Wie der Tabelle 7.6 zu entnehmen ist, beträgt der Mittelwert des DALI während der DS 28,05 und der Median 29,58. Dieses niedrige Ausgangsniveau wird durch die Variation der Steuerungsart auf 20,76 (Mittelwert) bzw. 21,25 (Median) gesenkt. Die relative Verbesserung kann diese signifikante Veränderung deutlicher veranschaulichen. Diese wird pro Versuchsperson i mittels

$$\Phi_{d,i} = \frac{d_{DS,i} - d_{MMW,i}}{d_{DS,i}} \quad (7.1)$$

gebildet. Folglich wird für jede Versuchsperson errechnet, um wie viel Prozent sich der DALI aufgrund der anderen Steuerungsart verbessert hat. Der Mittelwert der durchschnittlichen Verbesserungen liegt bei 23,2 %. Der Median liegt bei 18,4 %. Im Boxplot in Abbildung 7.21 sind diese Ergebnisse grafisch dargestellt. Im Scatterplot in Abbildung 7.21 werden die durchschnittlichen DALI-Werte jeder Versuchsperson pro Steuerungsart gegenübergestellt. Wären die Werte zwischen den Steuerungsarten innerhalb einer Versuchsperson ähnlich, würden sie nahe der gestrichelten Achsenhalbierenden liegen. Die meisten Punkte liegen jedoch unterhalb der Achsenhalbierenden. Demzufolge ist ein Großteil der DALI-Werte der DS größer als es die DALI-Werte der MMW sind. Vier von 34 Werten liegen über der Achsenhalbierenden. Mit dieser univariaten Betrachtung des DALI wird deutlich, dass die Versuchspersonen subjektiv hinsichtlich der mentalen Beanspruchung einen deutlichen Unterschied empfunden haben.

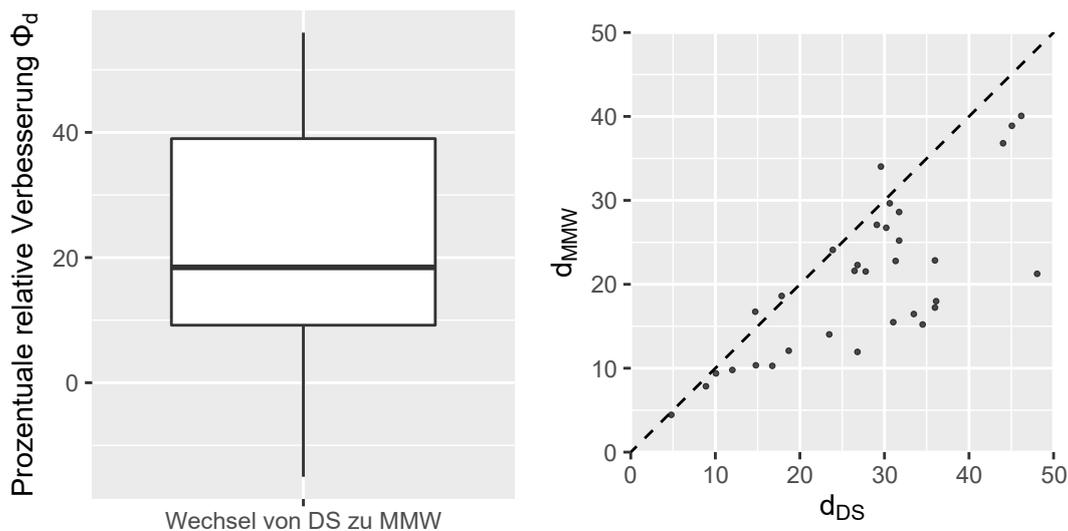


Abbildung 7.21: Links: Boxplot der prozentualen Verbesserung des DALI durch den Wechsel von der DS zur MMW. Rechts: Scatterplot, der die durchschnittlichen Werte des DALI jeder Versuchsperson pro Steuerungsart gegenüberstellt.

Weiter wird die Frequenz der HLW-Reaktionen f_{HR} untersucht. Anders als der DALI sind die Werte von f_{HR} nicht zwischen 0 und 100 normiert, sondern unterliegen wie andere, physiologische Größen interindividuellen Schwankungen. Für eine Vergleichbarkeit der Werte zwischen den Versuchspersonen ist daher eine Normierung notwendig. Es wird die Normierung der HLW-Reaktionen nach Lykken [242, S. 483] verwendet, die einen Minimal- und Maximalwert benötigt:

$$x_{i,norm} = \frac{x_{i,j} - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}} \quad (7.2)$$

$x_{i,j}$ ist die betrachtete, physiologische Größe einer Versuchsperson i für ein Experiment j . Der probandenabhängige Minimalwert wird in dieser Arbeit aus den Messungen der jeweiligen Ruhephasen zwischen den Aufgabenphasen bestimmt. Wie im Anhang D hergeleitet, ist für die Berechnung der relativen Verbesserung kein Maximalwert notwendig. Die relative Verbesserung untersucht erneut, um wie viel Prozent sich die Größe bei der Veränderung der Steuerungsart reduziert. Die Formel zur Bestimmung der relativen Verbesserung Φ_{HR} der Frequenz der HLW-Reaktionen f_{HR} ergibt sich zu

$$\Phi_{HR,i} = \frac{f_{HR,DS,i} - f_{HR,MMW,i}}{f_{HR,DS,i} - f_{HR,min,i}} \in [0, 1] \quad (7.3)$$

Im Boxplot in Abbildung 7.22 ist die Verteilung der relativen Verbesserung dargestellt. Der Median der Verbesserung beträgt 21,5 %, der Mittelwert aufgrund von zwei großen Ausreißern 4,5 %. Die beiden großen Ausreißer mit Werten kleiner als -250 % kommen dadurch zustande, dass zwischen deren Ruhemessungswert $f_{HR,min,i}$ und deren Wert für die DS $f_{HR,DS,i}$ nur ein geringer Unterschied vorliegt. Aufgrund der geringen Differenz im Nenner von Gleichung (7.3) wächst der Bruch unverhältnismäßig stark an. Anschaulich wird das im Scatterplot in Abbildung 7.22. Versuchspersonen, die während der Aufgabenphase einen Wert kleiner als 2,5 1/min haben, nähern sich damit ihrem Ruhemessungswert an und sorgen für unverhältnismäßig große relative Verbesserungen sowohl in positive als auch negative Richtung.

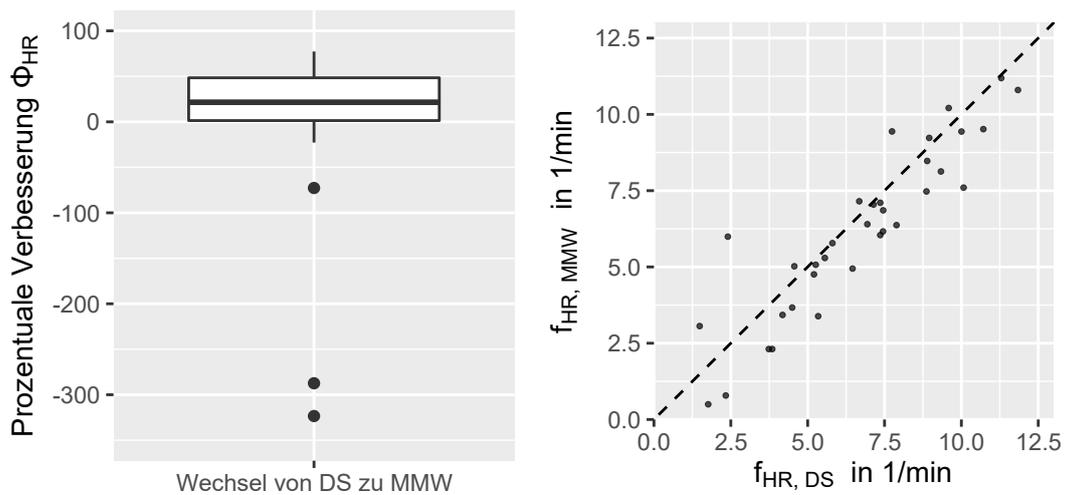


Abbildung 7.22: Links: Boxplot der prozentualen Verringerung der Frequenz der HLW-Reaktionen durch den Wechsel von der DS zur MMW. Rechts: Scatterplot, der die durchschnittlichen Werte der Frequenz der HLW-Reaktionen jeder Versuchsperson pro Steuerungsart gegenüberstellt.

Die Messungen der HLW-Reaktionen zeigen eine Reduktion der Mittelwerte bei dem Steuerungsartenwechsel von DS zu MMW. Dies spricht für eine Reduktion der mentalen Beanspruchung. Dies kann dem Scatterplot in Abbildung 7.22 entnommen werden. Der Großteil der Werte liegt unter der Achsenhalbierenden und ist damit während der DS größer als während der MMW. Die Punkte innerhalb des Scatterplots befinden sich jedoch deutlich näher an der Achsenhalbierenden, als das zum Beispiel für die DALI-Werte in Abbildung 7.21 der Fall ist. Die HLW-Daten für sich genommen sind folglich nicht so deutlich bezüglich des statistischen Unterschieds wie die subjektiven Daten. Dies entspricht den in Tabelle 7.7 dargestellten Ergebnissen, dass sich in den HLW-Daten kein statistisch signifikanter Unterschied findet.

Abschließend wird die Standardabweichung der RR-Intervalle betrachtet. In der grafischen Auswertung in Abbildung 7.23 findet sich ein geringer Unterschied zwischen den Messungen während der DS und der MMW. Im linken Scatterplot sind diese Werte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Mehrheit der Datenpunkte über der Achsenhalbierenden liegt (22 von 34). Größere Werte der Standardabweichung der RR-Intervalle sprechen für eine Reduktion der Beanspruchung [135, S. 41]. Die Punkte liegen jedoch vergleichsweise nahe an der Achsenhalbierenden, was auf einen geringen Unterschied hindeutet. Ähnlich verhält es sich mit der Gegenüberstellung der Messungen während der Aufgabenphasen gegenüber den Ruhephasen. Der Großteil der Messungen ist während der Aufgabenphasen kleiner als während der Ruhephasen. (DS gegenüber Ruhephase: 21 zu 34, MMW gegenüber Ruhephase: 20 zu 34). Jedoch liegt auch hier der Großteil der Messpunkte vergleichsweise nahe an der Achsenhalbierenden. Zusammenfassend lässt sich für die Standardabweichung der RR-Intervalle ein geringer Unterschied feststellen.

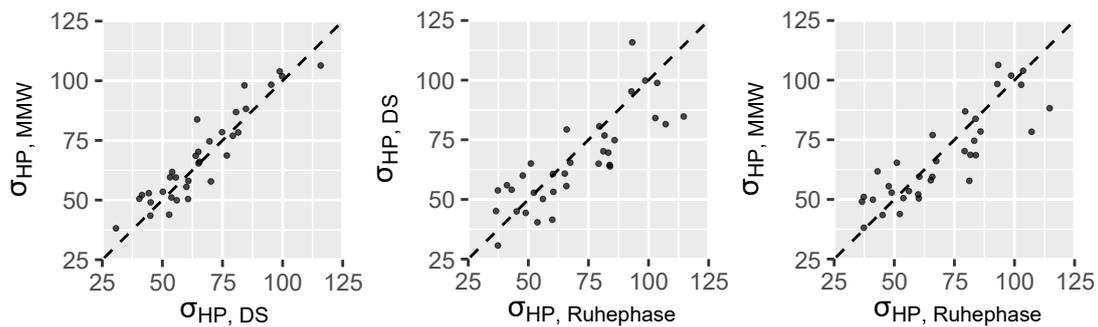


Abbildung 7.23: Scatterplot der Standardabweichungen der RR-Intervalle zwischen den einzelnen Studienphase. Links: MMW gegenüber DS, Mitte: DS gegenüber Ruhephase, Rechts: MMW gegenüber Ruhephase.

7.3.8 Diskussion der Studie

Das Ziel der Simulatorstudie ist es, herauszufinden, inwieweit sich die mentale Beanspruchung und die Situationslösedauer der MMW im Vergleich zu der DS reduziert. Die entsprechenden Hypothesen werden im vorherigen Abschnitt positiv beurteilt. In der sich anschließenden Diskussion wird auf die Interpretation und die Einordnung der gewonnenen Ergebnisse eingegangen, um daraufhin Grenzen der Studie aufzuzeigen.

Interpretation der Studienergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des vorherigen Abschnittes über die statistischen Ergebnisse hinaus interpretiert.

Interpretation der Deutlichkeit der Reduktion der mentalen Beanspruchung

Die einfaktorielle MANOVA mit Messwiederholung aus Abschnitt 7.3.7 lässt sich hinsichtlich des Unterschieds der mentalen Beanspruchung ausführlicher mit Hilfe der Effektgröße interpretieren. Die Bereiche der Effektgröße η^2 sind nach Cohen gegliedert in gering (0,01), mittel (0,06) und groß (0,14). Der Wert der Effektgröße $\eta^2 = 0,26$ findet sich deutlich im Bereich einer großen Effektgröße und zeigt eine große, relative Reduktion der mentalen Beanspruchung unter der Berücksichtigung aller abhängigen Variablen und ihrer Interaktionen an.

Der Effekt ist so groß, dass er sich auch anhand der univariaten Betrachtungen aus dem vorherigen Abschnitt erkennen lässt. Diese können den Effekt nicht vollständig abbilden, weil sie die Interaktionen zwischen den abhängigen Variablen vernachlässigen. Dennoch werden sie aufgrund ihrer Verständlichkeit und ihrer anschaulichen Interpretierbarkeit aufgeführt. Entsprechend der Interpretation der Scatterplots der DALI-Werte (Abbildung 7.21) und der Frequenz der HLW-Reaktionen (Abbildung 7.22) ist in diesen Daten ein deutlicher Unterschied zwischen den Kenngrößen der jeweiligen Steuerungsart erkennbar.

Der geringe Unterschied der Standardabweichung der RR-Intervalle (Abbildung 7.23) kann mehrere Gründe haben. Es lässt sich nicht abschließend klären, ob die Herzmessung die anderen Messarten in ihrem deutlichen Ergebnis relativiert oder die Herzmessung an sich weniger sensitiv gegenüber der mentalen Beanspruchung im Vergleich zu den anderen Messverfahren ist. Zumindest zeigt die Herzmessung in ihrem Ergebnis nicht in eine entgegengesetzte Richtung,

sondern lediglich schwächer in die gleiche Richtung. Darüber hinaus kann für die geringere Sensitivität der Herzmessung sprechen, dass die Herzperiode von Sympathikus und Parasympathikus gesteuert wird und dementsprechend nicht gleichermaßen sensitiv gegenüber mentalen Beanspruchungsveränderungen ist wie der HLW, der allein vom Sympathikus gesteuert ist. Die Kenngröße der Quadratwurzel der Differenzen der aufeinanderfolgenden Herzperioden (RMSSD) wurde vom Autor ebenfalls berechnet. Die Tendenz zeigt in die gleiche Richtung und der Unterschied ist ebenfalls schwach. Die RMSSD ist eine weitere, häufig verwendete Kenngröße, die auf Basis der Herzratenvariabilität Aussagen über den Aktiviertheitszustand einer Person trifft [139, 141]. Damit kann die in Abschnitt 2.4.3 beschriebene Sensitivität der Herzratenvariabilität bezüglich mentaler Beanspruchungsunterschiede in dieser Studie nicht bestätigt werden.

Zusammenfassend weist der Unterschied zwischen den Steuerungsarten einen großen Effekt auf. Dieser Effekt ist selbst in den univariaten Betrachtungen ohne die multivariaten Interaktionen zu erkennen. Keine der abhängigen Variablen für sich genommen widerspricht in ihrer Ergebnisrichtung anderen abhängigen Variablen.

Allgemein niedrige Beanspruchung

Wie der Tabelle 7.6 zu entnehmen ist, beträgt der Mittelwert des DALI während der DS 28,05 und der Median 29,58. Dieser Wert ist niedriger als der in Abschnitt 2.4.5 aufgeführte Median für NASA TLX Werte im Bereich des Autofahrens (41,52). Insgesamt entspricht das dem Eindruck des Studienleiters, dass die Versuchspersonen während der Studie nur gering beansprucht waren. Das steht zunächst im Widerspruch zu der in Abschnitt 5 aufgeführten Theorie, die erwarten ließe, dass die Teleoperation von Straßenfahrzeugen aufgrund nachteiliger Veränderungen beanspruchender ist als das konventionelle Steuern eines Fahrzeugs. Zudem sind bei früheren, in Abschnitt 2.4.4 beschriebenen Studien im Bereich der Teleoperation höhere Werte berichtet worden. Im Folgenden werden die Einflüsse und Hintergründe bezüglich der niedrigen Werte diskutiert.

Der Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Studie ist der Beanspruchungsunterschied zwischen den beiden Steuerungsarten, nicht die absolute Beanspruchung. Die deswegen getroffenen Entscheidungen im Studiendesign tragen wesentlich dazu bei, dass das Beanspruchungsniveau absolut betrachtet gering ist. Wie in Abschnitt 7.3.2 erläutert, wurde während der Studie kein Zeitdruck auf die Versuchspersonen ausgeübt. Außerdem sind zu keinem Zeitpunkt mehrere Situationslöseanfragen gleichzeitig bei den Versuchspersonen eingegangen. Zudem handelte es sich bei den Situationen ausschließlich um Situationen, bei denen aufgrund einer hinderlichen Detektion die Weiterfahrt unterbrochen war. Andere Defekte oder Abläufe mussten nicht bewältigt werden. Alle Situationen ließen sich nach der gleichen Herangehensweise bearbeiten. Die Versuchspersonen wurden nicht mit für sie Unvorhersehbarem konfrontiert [243, S. 14]. Sie wurden nicht weiteren Einflüssen wie im beruflichen Alltag einer Leitwarte üblichen Nebentätigkeiten oder Lärm ausgesetzt. Demzufolge ist der in dieser Studie ermittelte niedrige absolute Wert der Beanspruchung erklärbar und plausibel. Dieses Beanspruchungsniveau ist nicht auf den Betrieb einer Leitwarte übertragbar.

Ein weiterer Grund für die allgemein niedrige Beanspruchung trotz der Teleoperation kann in den Aufgaben selbst liegen. Durchschnittlich steuerten die Versuchspersonen das Fahrzeug mit der DS lediglich 10 Sekunden pro gelöste Situation. Anschließend folgten durchschnittlich 59 Sekunden, in denen sie den DALI-Fragebogen ausfüllten und auf die nächste Aufforderung zur Teleoperationsaufgabe warteten. Insgesamt steuerte jede Versuchsperson das Fahrzeug durchschnittlich nur 77,4 Sekunden über den gesamten Verlauf dieses Abschlussstudientermins. Die

in Summe sehr geringe Beanspruchungsdauer kann ein weiterer Grund für die absolut betrachteten, niedrigen Werte des DALI sein.

Darüber hinaus liegt ein weiterer Grund für die vergleichsweise niedrigen DALI-Werte in der Berechnung des raw DALI. Dabei werden alle Dimensionen, so auch die Dimensionen auditory demand und interference, zu gleichen Teilen in die Berechnung des globalen DALI einbezogen. Das senkt in diesem Fall den Wert des raw DALI. Dies ist der Abbildung 7.24 zu entnehmen. Die Werte der Dimension auditory demand (rechts unten) bewegen sich nahe der 0. Es wurde kein Audio übertragen. Bezüglich der Interference gab es keine per Definition offensichtliche Sekundäraufgabe, die die Interference getriggert haben könnte. Dennoch finden sich hier einige Werte größer 0. Das kann bedeuten, dass von den Versuchspersonen die Teleoperation zum Teil als Multitask aufgefasst worden sein muss, der eine Interference erzeugt. Ohne die beiden Dimensionen auditory demand und interference wäre der Mittelwert des DALI 35,4. Das ist niedriger als der Durchschnittswert von 41 beim Autofahren, ist ihm aber deutlich näher.

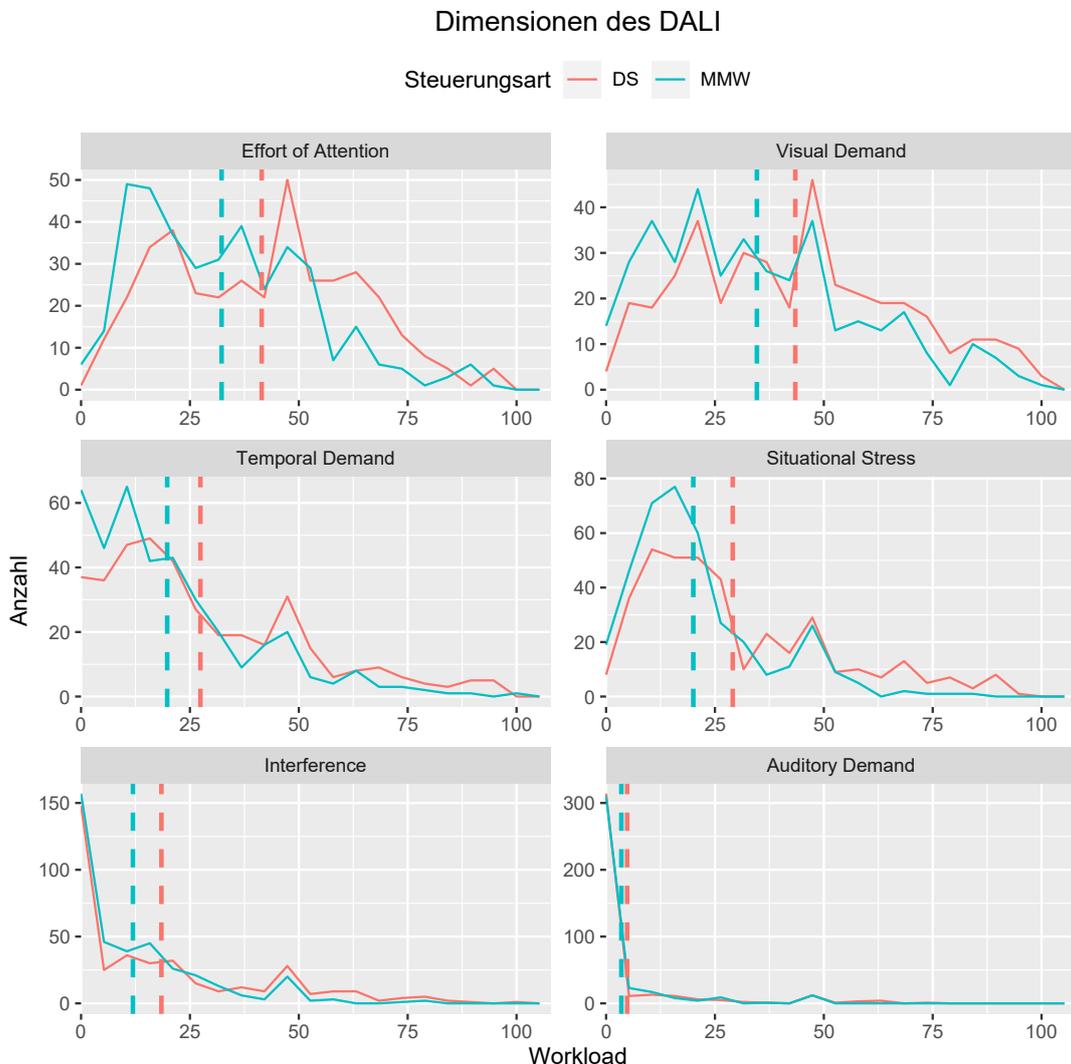


Abbildung 7.24: Histogramme der einzelnen Dimensionen des DALI. Die y-Achse (Anzahl) gibt die Anzahl der Rückmeldungen der Versuchspersonen nach den einzelnen Szenarien wieder. Die gestrichelten, vertikalen Linien stellen die Mittelwerte der jeweiligen Steuerungsart dar.

Zudem fanden die Untersuchungen im Simulator statt. Engström [244, S. 118] stellte im Vergleich zwischen Realfahrzeug- und Simulatoruntersuchung reduzierte physiologische Reaktionen fest, die er als ein niedrigeres Beanspruchungsniveau im Simulator aufgrund eines geringeren Risikos interpretiert.

Neben des Unterschieds durch den Simulator waren im Vergleich zu der von Georg durchgeführten Studie [13] die räumlichen Begebenheiten in den Szenarien nicht so eng. Weiter wurde auch im Vergleich zur von Georg durchgeführten Studie die Latenzzeit reduziert und die Anzahl der Kameras für den Operator erhöht. Ein weiterer Einfluss auf die niedrigen DALI-Werte kann die Erfahrung mit dem System aufgrund der Schulung aus Kapitel 7.1 sein.

Physiologische Größen als Aufwand-Nutzen-Abwägung

In zukünftigen Untersuchungen können legitime Thesen bezüglich der mentalen Beanspruchung explorativ mittels des DALI unter der Verwendung der Multiplen-Ressourcen-Theorie und der subjektiven Erhebung aufgestellt werden, ohne die aufwändigen, physiologischen Messungen durchführen und auswerten zu müssen.

Entsprechend der Tabelle 7.7 ist festzustellen, dass der DALI für sich genommen ein signifikantes Ergebnis aufweist. Eine Untersuchung alleinig auf Basis des DALI hätte die Ergebnisse in 7.3.7 nicht verändert. Dementsprechend ist in Zukunft abzuwägen, wie umfangreich das Bild bezüglich des Zustands des Operators generiert werden soll. Für eine explorative Untersuchung der mentalen Beanspruchung ist der DALI ausreichend. Für ein umfangreicheres Bild empfiehlt der Autor die Erhebung physiologischer Daten.

Aufgrund der physiologischen Daten ist ein umfangreicheres Bild bezüglich der mentalen Beanspruchung möglich. Dies führt der nächste Abschnitt aus.

Der ideale Zustand zwischen Über- und Unterbeanspruchung

Das Ziel dieses Abschnittes ist es, weitere Zustände neben der Überbeanspruchung wie der Gefahr der Gedankenwanderung oder dem Tunnelblick und der Unaufmerksamkeitsblindheit als Erklärung für die aufgetretenen Fehlentscheidungen während der MMW zu diskutieren und deren Operationalisierung vorzustellen.

Während sich die Leistung der Operatoren gemessen an der Bearbeitungsdauer pro Szenario bei der MMW im Vergleich zur DS, wie im Abschnitt 7.3.7 dargestellt, verbesserte, nahm die Leistung gemessen am Anteil korrekter Entscheidungen leicht ab. Aus der Tabelle 5.2 ist zu entnehmen, dass während der MMW zwei Szenarien freigegeben wurden, die nicht überfahrbar sind. Dabei handelte es sich um den Müllsack und das Paket, wie sie in Abbildung 7.12 zu sehen sind. Bei einem Realfahrzeug hätte der Operator durch diese Entscheidung eine Kollision eingeleitet. Bei der DS wurde kein Szenario dieser Art fälschlicherweise freigegeben.

Eine Erklärung kann sein, dass die Operatoren aufgrund der äußeren Monotonie und der Unterbeanspruchung in einen leistungs-, aufmerksamkeits- und motivationsärmeren Bereich gekommen sind [245, 246]. Dafür spricht die Kombination aus niedrigen DALI-Werten und der reduzierten physiologischen Aktiviertheit. Diese Leistungseinbußen, wie sie bereits von De Waard in der Abbildung 2.9 angeführt werden, können nicht mit der Multiplen Ressourcen Theorie erklärt werden (Abschnitt 2.3.3). Das Gebiet der Neuroergonomie bringt dafür passende Modelle hervor. Die Neuroergonomie erweitert das Fachgebiet der Ergonomie, indem es Erkenntnisse und Fortschritte der Neurowissenschaften auf die Ergonomie überträgt [247, S. 468]. Sie zeigt, dass kognitive Zustandsänderungen die Physiologie messbar beeinflussen. Darauf

aufbauend entstehen neuere Modelle zur Erklärung des Zusammenhangs aus Leistungs- und Zustandsänderungen. Dehais [91, S. 6] stellt einen zweidimensionalen, konzeptuellen Betrachtungsraum vor, innerhalb dessen er Bereiche unterschiedlicher Zustände identifiziert. Die beiden Dimensionen sind die physiologische Aktiviertheit [91, S. 6] und das Aufgabenengagement, das den Grad des Aufwands im Dienste der kognitiven Ziele oder der Aufgabe wiedergibt [91, S. 5]. Dies ist in Abbildung 7.25 dargestellt. Bei einer ungünstigen Ausprägungskonstellation dieser beiden Dimensionen befindet sich der Mensch außerhalb der Komfortzone in einem leistungsbeeinträchtigten Zustand. Diese Zustände sind die Gedankenwanderung, die Anstrengungsminderung, das Beharren auf einem falschen Lösungsansatz und die Unaufmerksamkeitsblindheit.

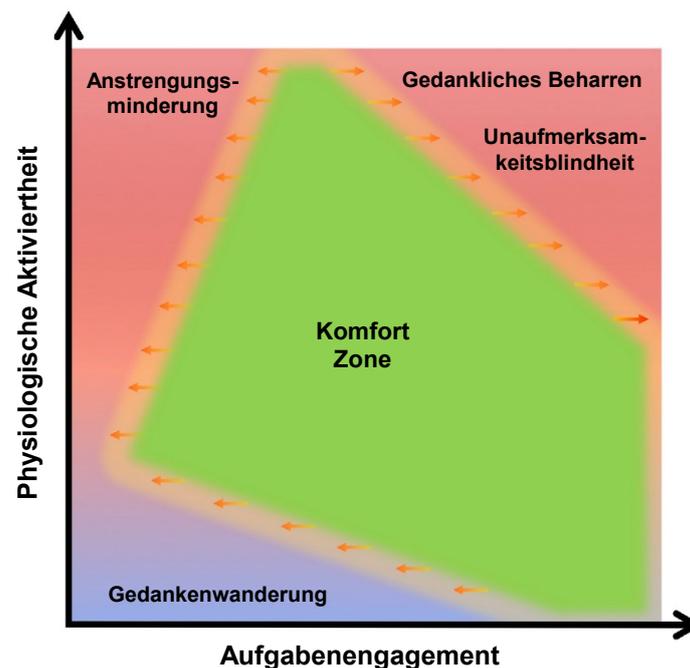


Abbildung 7.25: Dehais [91, S. 6] Modell zur Einordnung leistungsverschlechternder, menschlicher Zustände über die beiden Dimensionen der physiologischen Aktiviertheit und des Aufgabenengagements (Übersetzung des Autors).

Der ungünstige Zustand der Gedankenwanderung kann möglicherweise die Fehlentscheidungen einiger Versuchspersonen erklären. Gedankenwanderung bedeutet, dass ein Wechsel der Aufmerksamkeit weg von der Primäraufgabe hin zu internen Informationen wie zum Beispiel Erinnerungen stattfindet [248, S. 946]. Die Versuchspersonen wiesen bei der MMW gemessen an den HLW-Reaktionen eine reduzierte physiologische Aktiviertheit auf. Aufgrund der Monotonie der Aufgabe kann das Aufgabenengagement gesenkt worden sein. Folglich kann bei den Versuchspersonen das Gedankenwandern aufgetreten sein und zu Fehlentscheidungen geführt haben, während die Bedienung des Systems aufgrund der häufigen Wiederholung bereits in einen automatisierten, menschlichen Prozess übergegangen ist.

Aktuell können die Phasen der Gedankenwanderung mit physiologischen Messungen wie EKG, HLW oder okulometrischen Messungen noch nicht automatisch detektiert werden. Unterschiede zwischen den Gedankenwanderungs- und nicht-Gedankenwanderungs-Phasen konnten jedoch festgestellt werden [249–251]. Erste Erfolge einer automatischen Detektion sind mit EEG-Messungen zu verzeichnen [252]. Eine realistische Operationalisierung ist eher die Ausweitung der

Befragungen. Die Versuchspersonen können bezüglich ihrer Gedankenwanderung, ihrer Motivation, ihrem Interesse und weiteren, das Aufgabenengagement betreffenden Aspekten befragt werden [250, 253]. Ein zusätzliches Messen der physiologischen Aktiviertheit mittels physiologischer Größen bietet sich an [249, 250]. Dieses Vorgehen kann auf die weiteren Zustände wie zum Beispiel der Unaufmerksamkeitsblindheit übertragen werden [254, 255]. Ein entsprechend multivariates Vorgehen führt zu einem umfassenderen Bild über die Zustände der Operatoren [256, S. 391].

Einfluss der Szenariengestaltung

Wie im Abschnitt des szenarieninduzierten Beanspruchungsunterschieds (7.3.7) beschrieben, sind die Szenarien bezüglich der Umgebung ähnlich und den Wetterbedingungen identisch gestaltet. Dennoch ergibt die obige explorative Untersuchung, dass zwischen zwei der drei Straßengeometrien ein signifikanter Unterschied der mentalen Beanspruchung feststellbar ist. Das lässt einen Einfluss des Szenarios auf die Beanspruchung vermuten.

Aufgrund der geringen Anzahl an Szenarien und den vielen veränderten und veränderbaren Szenarien-Parametern können nicht eindeutig Ursachen für die Beanspruchungsunterschiede zwischen den Szenarien bestimmt werden. Die Unterschiede zwischen den Szenarien umfassen die überfahrbaren Objekte, die Straßengeometrie, die Anzahl der Fußgänger und deren Verhalten sowie die Anwesenheit von Gegenverkehr. Das spiegelt keineswegs die Vielfalt des alltäglichen Straßenverkehrs wider. Beispielsweise enthielten die Szenarien keine Fahrradfahrer oder ungünstige Wetterverhältnisse. Es wird erwartet, dass neben der Steuerungsart die Szenarien an sich einen entscheidenden Einfluss auf die Beanspruchung haben können [257, S. 44]. Das Auffinden der wesentlichen Einflüsse auf die Beanspruchung kann einen zukünftigen, anwendungsabhängigen Untersuchungsgegenstand darstellen.

Grenzen der Studie

Jedes experimentelle Design wird durch Störfaktoren beeinflusst, die die Reliabilität und Validität des Experiments einschränken.

Erfahrung der Versuchspersonen

Die Versuchspersonen waren nach Kapitel 7.1 geschult. Dadurch ist das Ergebnis des Beanspruchungsunterschieds und der Situationslösedauer näher an der Realität, als wenn die Versuchspersonen anstatt einer Schulung nur eine Einführung in das System durchlaufen hätten. Dennoch sind die Versuchspersonen keine langjährigen Experten. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmender Erfahrung in der Bedienung der DS deren Beanspruchung weiter sinken kann, weil die DS ein manuell zu bedienendes, fertigkeitstbasiertes System ist, für dessen Beherrschung Übung notwendig ist [152, S. 231]. Nach Friedrich [258, S. 721] ist bei Piloten die Beanspruchung bei manueller Steuerung in anspruchsvollen Szenarien umso größer, je niedriger die Erfahrung ist. Es wird erwartet, dass dies aus dem Bereich der Luftfahrt auf die Teleoperation übertragen werden kann. Nach Rasmussens Drei-Ebenen-Modell ist mit entsprechender Übung ein Wechsel hin zu fertigkeitstbasiertem Verhalten zu erwarten (Abschnitt 2.3.2). Entsprechend den in Abschnitt 5 erläuterten nachteiligen Umständen der DS wird erwartet, dass dennoch eine Beanspruchungsreduktion durch die Anwendung der MMW bestehen bleibt.

Probandenkollektiv

Eine repräsentative Gruppe von Operatoren im Kontext der Leitwarte einer AF-Flotte gibt es noch nicht. Dementsprechend ist ungewiss, zu welchem Grad sich das vorliegende Probandenkollektiv auf den späteren Anwendungsfall der Leitwarte übertragen lässt. Das Probandenkollektiv ist mit einem Durchschnittsalter von 24 Jahren, wie in Abbildung 7.14 dargestellt, relativ jung. Zudem überwiegt der Anteil der männlichen Teilnehmer (30) gegenüber den weiblichen Teilnehmern (4) deutlich.

7.4 Diskussion der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der MMW weitergehend diskutiert und in einem allgemeineren Kontext interpretiert. Des Weiteren werden zukünftige Untersuchungsgegenstände abgeleitet.

7.4.1 Konformität mit dem Gesetz zum autonomen Fahren

Das Gesetz zum autonomen Fahren [81, S. 2] schreibt vor, dass die Technische Aufsicht die vom Fahrzeug vorgeschlagenen Fahrmanöver begutachtet und wenn möglich freigibt. Die aktuelle Ausführung der MMW entspricht nicht dieser Vorgabe, weil der Operator aktiv zur Generierung eines Fahrmanövers beiträgt, indem er den befahrbaren Bereich selbst vorschlägt. Dies kann jedoch angepasst werden, um der Vorgabe des Gesetzes zu genügen. Das Fahrzeug kann standardmäßig einen bestimmten Bereich vor dem Fahrzeug als freizugebende Fläche vorschlagen, weil sich die überfahrbaren Objekte in den meisten Fällen in einem Standardbereich vor dem Fahrzeug befinden. Sollte es zu einer Situation kommen, in der der Vorschlag des Fahrzeugs nicht zielführend ist, kann in dem Gesetz zum autonomen Fahren auf die sogenannte sonstige Beeinträchtigung [81, S. 2] zurückgegriffen werden, die es in Ausnahmefällen der Technischen Aufsicht erlaubt, selbst aktiv zur Erstellung des Fahrmanövers beizutragen.

7.4.2 Verbesserung der Darstellung

Manchen Operatoren fiel es schwer, anhand der Videos die Objekte zu identifizieren und bezüglich deren Überfahrbarkeit zu klassifizieren. Einige Operatoren teilten das dem Studienleiter während oder nach der Studie mit. In den Daten spiegelt sich das in den insgesamt 20 von 544 Szenarien wider, in denen sich die Operatoren zu konservativ entschieden (Tabelle 5.2). Dafür können im Wesentlichen zwei Gründe gefunden werden.

Ein Grund für eine erschwerte Situationsbewertung ist, dass die vom Operator zu beurteilenden Objekte statisch sind und die Operatoren die Situation erst betrachteten, als das Egofahrzeug bereits stand. Folglich verhält sich das Video diesbezüglich eher wie ein Bild. Es findet keine Eigenbewegung und keine Bewegung des betroffenen Objekts statt. Das hat zur Folge, dass, wie in Abschnitt 5 beschrieben, die menschliche Tiefenwahrnehmung stark beeinträchtigt ist, weil keine Bewegungsparallaxe zur Tiefenwahrnehmung genutzt wird. Folglich ist es für die Operatoren schwer, die Tiefe und damit die Dimensionen des Objekts abzuschätzen. Der

Studienleiter konnte bei einigen Operatoren beobachten, dass sie ihren Kopf beim genauen Betrachten des Objekts seitlich vor dem Monitor hin und her bewegten, als wollten sie einen anderen Blickwinkel auf die Situation bekommen und dadurch intuitiv eine Bewegungsparallaxe erzeugen. Dies ist bei Videos allerdings nicht möglich. Entsprechend dieser Ursache können mehrere Maßnahmen zur Verbesserung ergriffen werden. Es wird am vielversprechendsten eingeschätzt, den Operatoren eine Aufnahme zur Entstehung der Situation wiederzugeben, wie es in Leitwarten anderer Bereiche üblich ist [259, S. 4]. Auf dem Playback wäre zu sehen, wie sich das Fahrzeug dem Objekt nähert. Damit wäre eine Bewegungsparallaxe zur Tiefenwahrnehmung aufgrund der Eigenbewegung vorhanden. Eine weitere Möglichkeit sind Kameras, die sich vom Operator aus translatorisch zur Seite verschieben lassen und eine Bewegungsparallaxe zur Tiefenwahrnehmung erzeugen. Alternativ könnten weitere Sensoren und Algorithmen genutzt werden, um eine dreidimensionale Ansicht des Objekts zu erzeugen [260, 261] und dem Operator wiedergeben zu können.

Ein weiterer Grund ist die beeinträchtigte Videoqualität. Aufgrund der limitierten Bandbreite ist die Auflösung reduziert und das Video komprimiert. Das erschwert es den Operatoren, die Objekte zu identifizieren. Von Hoffmann [262] wurde bereits gezeigt, dass der Grad der Komprimierung die Reaktionszeit der Operatoren verändert. Die ideale Videoqualität ist ein Zielkonflikt aus verfügbarer Datenrate, tolerierbarer Latenz und Erkennbarkeit der Umgebung trotz der Komprimierung [263]. Diese ist anwendungsfallabhängig und bedarf weiterer Erforschung.

7.4.3 Entwicklung ähnlicher Modifizierungen

Die Entwicklung ähnlicher Modifizierungsarten wird aus Sicht der Ergebnisse dieser Arbeit als sinnvoll erachtet. Es bestehen entsprechende Anwendungsfälle. Einige Beispiele möglicher Umsetzungen sind bereits im Stand der Wissenschaft 2.2.2 aufgeführt, wie beispielsweise die kurzzeitige Aussetzung bestimmter Verkehrsregeln [63, S. 28] oder die Änderung der Klassifikation eines Objektverhaltens von dynamisch zu statisch [53, S. 29].

Darüber hinaus kann die Modifizierung hochgenauer Karten sinnvoll sein, um ein temporäres Umfahren unüblicher Konstellationen zu ermöglichen. Beispielsweise sind nicht befahrbare Grünflächen bei dem für das automatisierte Fahren häufig verwendeten Framework Lanelet [194, S. 1676] als separate Elemente abgespeichert. Diese könnten gegebenenfalls vom Operator angepasst werden, damit eine temporäre Umfahrung über entsprechende Flächen möglich ist. Ebenfalls denkbar wäre eine kurzzeitige, durch den Operator überwachte Reduktion von Sicherheitsabständen.

Diese Entwicklungen könnten zudem konform zum Gesetz zum autonomen Fahren gestaltet werden, wie es in Abschnitt 7.4.1 erläutert ist. Es wird vermutet, dass einige Erkenntnisse dieser Arbeit auf entsprechende ähnliche Steuerungsarten übertragen werden können. Dementsprechend könnte die mentale Beanspruchung der Operatoren und die Lösungsdauer reduziert werden. Diese Entwicklungen sollten außerdem die Überwachung oder präventive Vermeidung von ungünstigen Zuständen der Operatoren, wie in Abschnitt 7.3.8 beschrieben, berücksichtigen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Forschungsarbeit entwickelt die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung als teleoperierte Steuerungsart und analysiert deren Auswirkungen auf die Operatoren. Die Teleoperation stellt eine effektive Möglichkeit dar, die Einführung von automatisierten Fahrzeugen zu beschleunigen. In Szenarien, in denen das AF überfordert ist, findet ein Operator eine passende Lösung und setzt diese um. Die Operatoren spielen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle. Deswegen wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen der neuen Teleoperationsart auf die Operatoren im Detail untersucht, um Handlungsempfehlungen für die Entwicklung zukünftiger Teleoperationsleitwarten ableiten zu können und ungeklärte Fragestellungen zu identifizieren.

Für die Entwicklung eines passenden Teleoperationskonzeptes ist die Kenntnis des Anwendungsfalls entscheidend. Die Recherche dieser Arbeit zeigte, dass für den Anwendungsfall der Teleoperation im Kontext innerstädtischer, automatisierter Fahrzeuge einzelne Anwendungsfälle existieren, jedoch keine Übersicht über die für die Teleoperation relevanten Szenarien und ihre Wirkmechanismen existiert. Damit beschäftigt sich die erste Forschungsfrage:

1. „Welche Szenarien und konkreten Anwendungsfälle muss die Teleoperation lösen können?“

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage fand aufbauend auf den Analysen der Disengagement Reports und der Recherche nach Unzulänglichkeiten ein Expertenworkshop statt. Mit Hilfe der sich anschließenden qualitativen Inhaltsanalyse wurden sieben Szenarienkategorien abgeleitet. Die Teleoperation mittels der DS ist bereits jetzt ein Lösungsansatz für den Großteil dieser Szenarien. Von Versuchspersonen früherer Studien wurde die DS jedoch als stark fordernd und anstrengend wahrgenommen. Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich mit den Gründen für die Entstehung dieser Wahrnehmung.

2. „Wie entsteht bei der Teleoperation mittels der direkten Steuerung mentale Beanspruchung und im Besonderen Überbeanspruchung?“

Einige Faktoren, die mentale Beanspruchung beeinflussen, sind bekannt. Dazu zählen im Wesentlichen die Kompensation der Latenzzeiten und der verminderten Videoqualität. Deren theoretische Zusammenhänge waren jedoch bislang unbekannt. Deswegen wurden in dieser Arbeit das Modell der Multiplen-Ressourcen nach Wickens und die Erkenntnisse der kognitiven Neurowissenschaften genutzt, um die Gründe für die mentale Beanspruchung während der Teleoperation zu finden. Das Ergebnis ist, dass im menschlichen Informationsverarbeitungsprozess aufgrund des Setups und der Aufgabe Flaschenhälse bei bestimmten kognitiven Ressourcen entstehen. Betroffen sind die Ressourcen der Perzeption-Kognition, der visuellen Perzeption und der fokalen Wahrnehmung. Diese theoretischen Erkenntnisse können für die Weiterentwicklung der Aufgabe und der Bedienoberfläche der Operatoren genutzt werden.

Die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung adressiert aus den bei der Beantwortung der Forschungsfrage 1 identifizierten Szenarien das Szenario des ungewöhnlichen Objekts. Zudem wird durch die Tatsache, dass die Operatoren nur für einen kleinen visuellen Bereich zuständig

sind, der kognitive Flaschenhals der visuellen Perzeption berücksichtigt. Der von den Operatoren zu scannende und verantwortende visuelle Bereich ist deutlich kleiner im Vergleich zur DS. Unter diesen Gesichtspunkten wurde die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung entwickelt und untersucht. Für die Untersuchung wurde zudem eine Probandenschulung entwickelt und vorgestellt. Die in diesem Zusammenhang formulierten Forschungsfragen drei und vier lauten:

3. „Reduziert eine Situationslösung mittels der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung die mentale Beanspruchung der Operatoren im Vergleich zu der direkten Steuerung?“
4. „Reduziert der Ansatz zur Situationslösung mittels der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung die Bearbeitungsdauer im Vergleich zu der direkten Steuerung?“

Beide Forschungsfragen wurden positiv beantwortet. Aus den Daten der Studie ergab sich eine Reduktion der mentalen Beanspruchung und der Situationslösedauer. Die detaillierte Analyse und Diskussion der Daten weist jedoch darauf hin, dass aufgrund der gesteigerten Monotonie andere ungünstige, kognitive Zustände wie die Gedankenwanderung auftreten können. Folglich leiten sich daraus zwei wesentliche, zukünftige Untersuchungsgegenstände ab.

Zum einen ist die Entwicklung anderer Modifizierungsarten zur Unterstützung der Fahrzeugautomatisierung sinnvoll. Beispielsweise werden automatisierte Fahrzeuge Situationen nicht selbständig lösen können, weil Kartierungen nicht aktuell sind oder zu konservative Regeln die Automatisierung an einer Weiterfahrt hindern. Eine Modifizierung der Problemursachen kann effektiv zur Situationslösung beitragen. Außerdem kann die Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung an einigen Punkten effektiv verbessert werden. Aus der Diskussion ergibt sich, dass ein Playback zur Situationsentstehung oder eine Umgestaltung dahingehend, dass das AF einen zu ignorierenden Bereich vorschlägt, Potential haben.

Zum anderen wird empfohlen, die Teleoperationstätigkeit umfassender in einer tatsächlichen Anwendung wie Logistikparks oder Häfen zu analysieren. Realistische Gegebenheiten wie Mehrfachanfragen, Zeitdruck oder geforderte Nebentätigkeiten wie die Dokumentation wären einzuschließen. Von besonderem Interesse ist dabei der Anteil der korrekten Entscheidungen der Operatoren. Physiologische Beobachtungen und subjektive Befragungen können Aufschluss über den aktuellen Zustand von Operatoren geben. Im nächsten Schritt könnte die Teleoperationsart und die Aufgabengestaltung der Operatoren adaptiv bezüglich deren kognitiven Zustände gestaltet werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Struktur der Arbeit	3
Abbildung 2.1:	Sense-Plan-Act-Architektur nach Brooks [28, S. 14].....	4
Abbildung 2.2:	Autoware-AI Übersicht Software-Stack nach Biggs [33].	5
Abbildung 2.3:	Auswertung der Disengagement Reports innerhalb der Makrokategorie Systemfehler nach Favaro [41, S. 142].	7
Abbildung 2.4:	Auswertung der Disengagement Reports innerhalb der Kategorie System Failure nach Zhang [43].....	7
Abbildung 2.5:	Eingriffsebenen der Teleoperation	10
Abbildung 2.6:	Veranschaulichung der unterschiedlichen Bezeichnungen Leitwartenpersonal und Operator anhand der Häufigkeit und der Möglichkeiten der Tätigkeit ...	15
Abbildung 2.7:	Informationsverarbeitungsprozess und Aufmerksamkeitsressourcen nach Wickens und Hollands [89, S. 4].....	18
Abbildung 2.8:	Multiple Ressourcen nach Wickens [90, S. 163].	19
Abbildung 2.9:	Workload-Perfomance-Modell nach De Waard [14, S. 24].....	20
Abbildung 2.10:	Grafische Darstellung der HLW-Komponenten nach Dawson [116, S. 225]	23
Abbildung 2.11:	Schematische Darstellung eines QRS-Komplexes nach Brandes [133, S. 202]	25
Abbildung 3.1:	In dieser Arbeit gewähltes Makrovorgehensmodell.....	33
Abbildung 3.2:	Vorgehen zur Analyse des Anwendungsgebiets der Teleoperation.....	35
Abbildung 3.3:	Übersicht über die Vorgehensweise zur Beanspruchungsanalyse des Teleoperationssetups	36
Abbildung 3.4:	Vorgehen zur prototypischen Umsetzung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung.....	37
Abbildung 3.5:	Vorgehen zur Untersuchung der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung in einer Probandenstudie	38
Abbildung 6.1:	Integration der Modifizierung der maschinellen Wahrnehmung in die Architektur eines automatisierten und teleoperierten Fahrzeugs nach [180] (Übersetzung des Autors).....	54
Abbildung 6.2:	Schematische Darstellung der Eingabe eines Polygonzugs durch den Operator. Die als Würfel dargestellte Erkennung wird nach Freigabe des Operators nicht an die Planung weitergegeben.	55

Abbildung 6.3:	Sicht des Operators bei der MMW	56
Abbildung 6.4:	Ablauf der MMW bei bewusst ausgeblendeten Videostreams. a) Das Fahrzeug kommt zum Stillstand und die rot eingefärbte Detektion verhindert eine Weiterfahrt. b) Der Operator umschließt die Detektion über einen Polygonzug. Die Detektion wird dadurch blau eingefärbt. c) Der Operator bestätigt seine Eingabe und entfernt dadurch die Detektion. Das Fahrzeug setzt seine Fahrt fort.....	57
Abbildung 7.1:	Plötzlicher Signalabfall (links) und Signalschwankungen (rechts) in den Messungen des HLW.	64
Abbildung 7.2:	Ein physiologisch nicht erklärbares Unterschwingen im tonischen Maß (grün) vor dem Anstieg im HLW-Signal (blau) führt zu einer unverhältnismäßig großen HLW-Reaktion im phasischen Maß (rot). Der betreffende Bereich (orange) wird als Fehler markiert.....	65
Abbildung 7.3:	Die Amplitude des phasischen Maßes agiert in einem kleinen Bereich (0,06 μ S). Demensprechend handelt es sich vermutlich nicht um HLW-Reaktionen, sondern um Messrauschen.....	66
Abbildung 7.4:	Die Bereiche der HLW-Reaktionen werden händisch gelabelt, um eine Baseline für den Vergleich der Methoden zum automatisierten Auffinden der HLW-Reaktionen zu haben.	67
Abbildung 7.5:	Vergleich der Peak-Finder anhand der Kenngrößen Sensitivität und Spezifität.	68
Abbildung 7.6:	Ein lokales Maximum wird fehlerhaft als R-Zacke detektiert (rotes X). Dabei handelt es sich um ein Messartefakt, das entfernt wird.....	69
Abbildung 7.7:	Der verrauschte Bereich (orange) lässt keine eindeutige Interpretation der R-Zacken zu. Der Bereich wird entsprechend gekennzeichnet.	69
Abbildung 7.8:	Übersicht über den Ablauf der Hauptstudie.....	72
Abbildung 7.9:	Operatorarbeitsplatz	74
Abbildung 7.10:	Gesamtlatenzzeit des Lenkradwinkels des Studienaufbaus anhand der zeitlichen Differenz zwischen Operatorlenkradwinkleingabe und erhaltener, operatorseitiger Lenkwinkelreaktion des Fahrzeugs.	75
Abbildung 7.11:	Darstellung der drei unterschiedlichen Straßen- und Infrastrukturszenen. Links: Gerade Straße, Mitte: beginnende Linkskurve, Rechts: Rechtskurve.....	75
Abbildung 7.12:	Nicht überfahrbare Hindernisse, die nicht innerhalb der Straße überfahren werden können. Links oben: Müllsack, Mitte oben: Paket, Rechts oben: Absperrung aus Leitkegeln, unten: Kanister vor dem Egofahrzeug.	76
Abbildung 7.13:	Von der automatisierten Wahrnehmung fälschlicherweise als Hindernis detektiert. Links: Dosen, Mitte: Kanaldeckel, Rechts: Zerstreutes Laub.	76
Abbildung 7.14:	Probandenkollektiv	77
Abbildung 7.15:	Lernkurve der DS während der Schulung in Termin 2. Die Versuchspersonen fahren das gleiche Szenario zweimal in der Simulation und zweimal mit dem Realfahrzeug in der gezeigten Reihenfolge.	78

Abbildung 7.16:	Verteilung der Situationslösedauer in den lösbaren und gelösten Szenarien	79
Abbildung 7.17:	Häufigkeitsverteilung der Artefaktquote für die HLW-Messung.....	80
Abbildung 7.18:	Visualisierung der abhängigen Variablen als Boxplot zwischen den jeweiligen Steuerungsarten. Links: DALI, Mitte: Frequenz der HLW-Reaktionen, Rechts: Standardabweichung der RR-Intervalle.....	82
Abbildung 7.19:	Boxplot der durchschnittlichen Situationslösedauern der Versuchspersonen abhängig von der Steuerungsart für die gelösten und lösbaren Szenarien..	83
Abbildung 7.20:	Aufschlüsselung der zeitlichen Anteile während der Situationslösung.	84
Abbildung 7.21:	Links: Boxplot der prozentualen Verbesserung des DALI durch den Wechsel von der DS zur MMW. Rechts: Scatterplot, der die durchschnittlichen Werte des DALI jeder Versuchsperson pro Steuerungsart gegenüberstellt.	86
Abbildung 7.22:	Links: Boxplot der prozentualen Verringerung der Frequenz der HLW-Reaktionen durch den Wechsel von der DS zur MMW. Rechts: Scatterplot, der die durchschnittlichen Werte der Frequenz der HLW-Reaktionen jeder Versuchsperson pro Steuerungsart gegenüberstellt.	87
Abbildung 7.23:	Scatterplot der Standardabweichungen der RR-Intervalle zwischen den einzelnen Studienphase. Links: MMW gegenüber DS, Mitte: DS gegenüber Ruhephase, Rechts: MMW gegenüber Ruhephase.....	88
Abbildung 7.24:	Histogramme der einzelnen Dimensionen des DALI. Die y-Achse (Anzahl) gibt die Anzahl der Rückmeldungen der Versuchspersonen nach den einzelnen Szenarien wieder. Die gestrichelten, vertikalen Linien stellen die Mittelwerte der jeweiligen Steuerungsart dar.....	90
Abbildung 7.25:	Dehais [91, S. 6] Modell zur Einordnung leistungsverschlechternder, menschlicher Zustände über die beiden Dimensionen der physiologischen Aktiviertheit und des Aufgabenengagements (Übersetzung des Autors).	92
Abbildung 8.1:	Angabe und Bearbeitungsbogen des World-Cafes	xxviii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Elektrodermale Größen, Definitionen und übliche Werte nach Dawson [116, S. 225]. Skin Conductance Level wird mit SCL abgekürzt, Skin Conductance Response mit SCR und Non-Specific Skin Conductance Response mit NS-SCR.....	24
Tabelle 5.1:	Beispielhafte Ressourcennutzung einer konventionellen Fahrzeugführung. Die erste Zeile „Konventionelles Fahren“ beinhaltet den errechneten Mittelwert der darunter angeordneten Werte. Die Werte erstrecken sich über vier Stufen von 0 (nicht genutzt) bis 1 (vollständig genutzt) und werden entsprechend dem Vorgehen nach Wickens [90, S. 168] subjektiv durch den Autor bestimmt. .	45
Tabelle 5.2:	Zusammenhang zwischen den Fahrinformationen und den menschlichen Sinneskanälen (aus Schweigert [160, S. 8] nach Tomaske [199]).....	46
Tabelle 5.3:	Übersicht der wesentlichen, nachteiligen Veränderungen von Wahrnehmungsaspekten aufgrund von Teleoperation	47
Tabelle 5.4:	Gegenüberstellung der Ressourcennutzung bei den Teilaufgaben der konventionellen und der teleoperierten Fahrzeugführung innerhalb der Multiplen-Ressourcen-Theorie. Jede zweite, nicht benannte Zeile adressiert die Teilaufgabe in der darüber liegenden Zeile während Teleoperation. Die Werte erstrecken sich über vier Stufen von 0 (nicht genutzt) bis 1 (vollständig genutzt) und werden entsprechend dem Vorgehen nach Wickens [90, S. 168] subjektiv durch den Autor bestimmt.	50
Tabelle 7.1:	Einordnung der Lernziele der Teleoperation (Nummer 1-14 aus Abschnitt 7.1.1) in die von Anderson [182, S. 4] überarbeitete Taxonomietabelle (Übersetzung durch den Autor)	59
Tabelle 7.2:	Stufen der Lehrstrategie für sich wiederholende Fähigkeitsart nach Romiszowski [185, S. 33]	60
Tabelle 7.3:	Terminübersicht über die Probandenschulung und deren Lehrinhalt und entsprechende Stufen	61
Tabelle 7.4:	Messgrößenabhängige, prozentuale Übereinstimmung der Bestimmung der erwarteten und berechneten Beanspruchungsphasen.....	70
Tabelle 7.5:	Vierfeldertafel zum Entscheidungsverhalten der Operatoren. In Klammern ist die Anzahl entsprechend der Steuerungsarten (DS/MMW) aufgedgliedert....	78
Tabelle 7.6:	Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen	81
Tabelle 7.7:	Teststatistiken der Post-Hoc Tests (gepaarte t-Tests)	85
Tabelle 8.1:	Tests auf univariate Normalverteilung	xxix

Tabellenverzeichnis

Tabelle 8.2:	Mardias Tests auf multivariate Normalverteilung	xxix
Tabelle 8.3:	Henze-Zirkler Tests auf multivariate Normalverteilung.....	xxx

Literaturverzeichnis

- [1] Mercedes, *Vorreiter bei automatisierten Fahr- und Sicherheitstechnologien*. [Online] Verfügbar: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/drive-pilot.html>. Gefunden am: Apr. 14 2022.
- [2] UNECE, *UN-Regelung Nr. 157 — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich des automatischen Spurhalteassistentensystems (ALKS) [2021/389]*.
- [3] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, J3016, 2021.
- [4] Waymo LLC, *Waymo One launches in Phoenix*. [Online] Verfügbar: <https://waymo.com/company/>. Gefunden am: Apr. 14 2022.
- [5] Fernride GmbH. [Online] Verfügbar: <https://www.fernride.com/use-case-production>. Gefunden am: Apr. 15 2022.
- [6] Phantom Auto, *Assisting Autonomy*. [Online] Verfügbar: <https://phantom.auto/solutions/assisting-autonomy>. Gefunden am: Apr. 15 2022.
- [7] Vay Technology GmbH, *The Journey Begins*. [Online] Verfügbar: <https://vay.io/>. Gefunden am: Sep. 10 2022.
- [8] Zoox Inc, *Autonomy*. [Online] Verfügbar: <https://zoox.com/autonomy/>. Gefunden am: Apr. 15 2022.
- [9] Reddit, *Waymo explains what 'Remote Operators' do*. [Online] Verfügbar: https://www.reddit.com/r/SelfDrivingCars/comments/e8bfse/waymo_explains_what_remote_operators_do/. Gefunden am: Apr. 15 2022.
- [10] World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety 2018*. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [11] National Highway Traffic Safety Administration, *National Motor Vehicle Crash Causation Survey: Report to Congress*. Verfügbar: <https://crash-tats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811059>. Gefunden am: Sep. 10 2022.
- [12] D. L. Hendricks, J. C. Fell, und M. Freedman, *The Relative Frequency of Unsafe Driving Acts in Serious Traffic Crashes [Summary Report]*, 2001.
- [13] J.-M. Georg, J. Feiler, F. Diermeyer, und M. Lienkamp, "Teleoperated Driving, a Key Technology for Automated Driving? Comparison of Actual Test Drives with a Head Mounted Display and Conventional Monitors," in *International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2018.
- [14] D. de Waard, "The measurement of drivers' mental workload," Dissertation, Groningen, 1996.

- [15] H. Xu, Y. Gao, F. Yu, und T. Darrell, "End-to-end Learning of Driving Models from Large-scale Video Datasets," *CoRR*, 2016.
- [16] Y. Xiao, F. Codevilla, A. Gurram, O. Urfalioglu, und A. M. López, "Multimodal End-to-End Autonomous Driving," in *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
- [17] M. Bojarski *et al*, "End to End Learning for Self-Driving Cars," *CoRR*, 2016.
- [18] Y. Pan *et al*, "Agile Off-Road Autonomous Driving Using End-to-End Deep Imitation Learning," *CoRR*, Bd. abs/1709.07174, 2017.
- [19] J. Zhang, "End-to-End Learning for Autonomous Driving," Department of Computer Science, New York University, New York, 2019.
- [20] S. Pendleton *et al*, "Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles," in *MDPI Machines*, 2017, S. 1–54.
- [21] S. Liu, L. Li, J. Tang, S. Wu, und J.-L. Gaudiot, *Creating Autonomous Vehicle Systems*, 2020.
- [22] H. Qiu, A. Ayara, und B. Glimm, "A Knowledge Architecture Layer for Map Data in Autonomous Vehicles," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, S. 1–6.
- [23] V. Kibalov und O. Shipitko, "Safe Speed Control and Collision Probability Estimation Under Ego-Pose Uncertainty for Autonomous Vehicle," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, S. 1–6.
- [24] A. Ranjbar, C.-H. Yeh, S. Hornauer, S. X. Yu, und C.-Y. Chan, "Scene Novelty Prediction from Unsupervised Discriminative Feature Learning," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, S. 1–7.
- [25] S. Fan *et al*, "Improving Road Detection Results Based on Ensemble Learning and Key Samples Focusing," in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, S. 1–7.
- [26] A. Tampuu, T. Matisen, M. Semikin, D. Fishman, und N. Muhammad, "A Survey of End-to-End Driving: Architectures and Training Methods," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, S. 1–21, 2020.
- [27] B. Siciliano und O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [28] R. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Bd. 2, Rn. 1, S. 14–23, 1986.
- [29] J. M. Anderson *et al*, *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2016.
- [30] Autoware Foundation. [Online] Verfügbar: <https://www.autoware.org/>.
- [31] *Technical Report 103 562 - V2.1.1*, ETSI TR 103 562, 2019.
- [32] Ö. Ş. Taş, F. Kuhnt, J. M. Zöllner, und C. Stiller, "Functional system architectures towards fully automated driving," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016, S. 304–309.
- [33] G. Biggs, *Autoware-AI: Übersicht*. [Online] Verfügbar: <https://github.com/Autoware-AI/autoware.ai/wiki/Overview>. Gefunden am: Nov. 29 2021.

- [34] F. Gies, A. Danzer, und K. Dietmayer, "Environment Perception Framework Fusing Multi-Object Tracking, Dynamic Occupancy Grid Maps and Digital Maps," *International Conference on Intelligent Transportation*, S. 3859–3865, 2018.
- [35] Waymo, "Waymo Safety Report: On the Road to Fully Self-Driving," 2017.
- [36] J. Kim, K. Jo, K. Chu, und M. Sunwoo, "Road-model-based and graph-structure-based hierarchical path-planning approach for autonomous vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Bd. 228, Rn. 8, S. 909–928, 2014.
- [37] C. Jung, D. Lee, S. Lee, und D. H. Shim, "V2X-Communication-Aided Autonomous Driving: System Design and Experimental Validation," *Sensors*, Bd. 20, Rn. 10, <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2903>, 2020.
- [38] California Department of Motor Vehicles (CA DMV), *About the California Department of Motor Vehicles*. [Online] Verfügbar: <https://www.dmv.ca.gov/portal/about-the-california-department-of-motor-vehicles/>. Gefunden am: Dez. 06 2021.
- [39] "Testing of Autonomous Vehicles," in *California Code Of Regulations*, California Department of Motor Vehicles (CA DMV), Hrsg, 2021, S. 1–13.
- [40] A. Sinha, S. Chand, V. Vu, H. Chen, und V. Dixit, "Crash and disengagement data of autonomous vehicles on public roads in California," (eng), *Scientific data*, Bd. 8, Rn. 1, 2021.
- [41] F. Favarò, S. Eurich, und N. Nader, "Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations," (eng), *Accident; analysis and prevention*, Bd. 110, S. 136–148, 2018.
- [42] S. S. Banerjee, S. Jha, J. Cyriac, Z. T. Kalbarczyk, und R. K. Iyer, "Hands Off the Wheel in Autonomous Vehicles?: A Systems Perspective on over a Million Miles of Field Data," in *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*, 2018, S. 586–597.
- [43] Y. Zhang, X. J. Yang, und F. Zhou, "Disengagement Cause-and-Effect Relationships Extraction Using an NLP Pipeline," Nov. 2021. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/2111.03511v1>.
- [44] N. Leveson, *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety*. Cambridge Mass.: MIT Press, 2011.
- [45] A. M. Boggs, R. Arvin, und A. J. Khattak, "Exploring the who, what, when, where, and why of automated vehicle disengagements," (eng), *Accident; analysis and prevention*, Bd. 136, S. 1–11, 2020.
- [46] A. Geiger, P. Lenz, und R. Urtasun, "Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite," in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2012.
- [47] M. Everingham, L. van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, und A. Zisserman, "The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge," *International Journal of Computer Vision*, Bd. 88, Rn. 2, S. 303–338, 2010.

- [48] A. Geiger, *Object Detection Evaluation 2012*. [Online] Verfügbar: http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_object.php?obj_benchmark=2d. Gefunden am: Dez. 15 2021.
- [49] X. Dai und X. Wei, "HybridNet: A fast vehicle detection system for autonomous driving," *Signal Processing: Image Communication*, Bd. 70, S. 79–88, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596518303771>, 2019.
- [50] F. Yu *et al*, "BDD100K: A Diverse Driving Dataset for Heterogeneous Multitask Learning," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020.
- [51] M. Mihelj, *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation*. Dordrecht: Springer, 2012.
- [52] S. Hirche und M. Buss, "Human Perception Oriented Control Aspects of Networked Telepresence and Teleaction Systems," *SICE Annual Conference 2005*, S. 3430–3435, 2005.
- [53] A. Lockwood *et al*, "Interactions between vehicle and teleoperations system", U.S. 15/644267. Zoox Inc, Januar 10, 2019
- [54] N. Fairfield, J. S. Herbach, und V. Furman, "Remote assistance for autonomous vehicles in predetermined situations", U.S. 15/618768. Waymo LLC, März 26, 2019
- [55] A. Lockwood *et al*, "Teleoperator Situational Awareness", U.S. 16/789836. Zoox Inc, Juni 11, 2020
- [56] J. Feiler, S. Hoffmann, und F. Diermeyer, "Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet," in *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems: IEEE*, 2020, S. 1–6.
- [57] T. Zhang, "Toward Automated Vehicle Teleoperation: Vision, Opportunities, and Challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, Bd. 7, Rn. 12, S. 11347–11354, 2020.
- [58] C. Kettwich, A. Schrank, und M. Oehl, "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*, Bd. 5, Rn. 5, <https://www.mdpi.com/2414-4088/5/5/26>, 2021.
- [59] D. Schitz, G. Graf, D. Rieth, und H. Aschemann, "Interactive Corridor-Based Path Planning for Teleoperated Driving," in *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE): IEEE*, Feb. 2021 - Feb. 2021, S. 174–179.
- [60] T. Caldwell *et al*, "Remote Vehicle Guidance", U.S. 16/457646. Zoox Inc, Dezember 31, 2020
- [61] T. Caldwell *et al*, "Vehicle Control and Guidance", U.S. 16/457654. Zoox Inc, Dezember 31, 2020
- [62] R. Gogna, "Collaborative Vehicle Guidance" 16/852057. I. Zoox, Oktober 21, 2021
- [63] R. Gogna, M. Goldman, und P. Orecchio, "Techniques for Navigating Vehicles Using Teleoperator Instructions", U.S. 16/457341. Zoox Inc, Dezember 31, 2020
- [64] A. Szpotowicz, "Entwicklung einer Steuerung von teleoperierten, autonomen Fahrzeugen auf Manöverebene," Master-Thesis, Technische Universität München (TUM), München, 2018.

-
- [65] S. Gnatzig, "Trajektorienbasierte Teleoperation von Straßenfahrzeugen auf Basis eines Shared-Control-Ansatzes," Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [66] M. Biehler, M. Geigenfeind, und B. Peters, "Verfahren und System zum Fernsteuern eines Fahrzeugs". Continental Automotive GmbH
- [67] B. Ross, J. Bares, D. Stager, L. Jackel, und M. Perschbacher, "An Advanced Teleoperation Testbed," in *Field and Service Robotics*, 2008.
- [68] S. Gnatzig, F. Chucholowski, T. Tang, und M. Lienkamp, "A System Design for Teleoperated Road Vehicles," in *ICINCO 2013*, Jul. 2013.
- [69] H. Pongrac, "Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden," Dissertation, Universität der Bundeswehr München, München, 2008.
- [70] B. Blissling, F. Bruzelius, und O. Eriksson, "Effects of Visual Latency on Vehicle Driving Behavior," in *ACM Trans. Appl. Percept*, Association for Computing Machinery, Hrsg. 14th Aufl, 2016, S. 1–12.
- [71] D. Cunningham, A. Chatziastros, v. d. M. Heyde, und H. Bülthoff, "Driving in the future: Temporal visuomotor adaptation and generalization," *Journal of Vision*, 2001.
- [72] A. Hosseini, T. Wiedemann, und M. Lienkamp, "Interactive Path Planning for Teleoperated Road Vehicles in Urban Environments," in *IEEE ITSC: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2014.
- [73] A. Hosseini, "Conception of Advanced Driver Assistance Systems for Precise and Safe Control of Teleoperated Road Vehicles in Urban Environments," Dissertation, München, 2018.
- [74] A. Schimpe und F. Diermeyer, "Steer with Me: A Predictive, Potential Field-Based Control Approach for Semi-Autonomous, Teleoperated Road Vehicles," in *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems: IEEE*, 2020.
- [75] G. Graf, H. Xu, D. Schitz, und X. Xu, "Improving the Prediction Accuracy of Predictive Displays for Teleoperated Autonomous Vehicles," in *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2020, S. 440–445.
- [76] F. E. Chucholowski, "Eine vorausschauende Anzeige zur Teleoperation von Straßenfahrzeugen: Beseitigung von Zeitverzögerungseffekten im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis," Technische Universität München, München, 2015.
- [77] G. Graf *et al*, "The Predictive Corridor: A Virtual Augmented Driving Assistance System for Teleoperated Autonomous Vehicles," in *International Conference on Artificial Reality and Telexistence Eurographics Symposium on Virtual Environments*, 2020, S. 61–69.
- [78] T. L. Tang Chen, "Methods for improving the control of teleoperated vehicles," Dissertation, Technische Universität München (TUM), München, 2014.
- [79] J.-M. Georg, J. Feiler, S. Hoffmann, und F. Diermeyer, "Sensor and Actuator Latency during Teleoperation of Automated Vehicles," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2020*, 2020.

- [80] S. Neumeier, E. A. Walelgne, V. Bajpai, J. Ott, und C. Facchi, "Measuring the Feasibility of Teleoperated Driving in Mobile Networks," *2019 Network Traffic Measurement and Analysis Conference*, 2019.
- [81] *Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes: Gesetz zum autonomen Fahren*, 2021.
- [82] S. Hoffmann, D. Majstorović, und F. Diermeyer, "Safe Corridor: A Trajectory-Based Safety Concept for Teleoperated Road Vehicles," in *2022 International Conference on Connected Vehicle and Expo (ICCVEx)*, 2022, S. 1–6.
- [83] C. Kettwich, A. Schrank, H. Avsar, und M. Oehl, "What If the Automation Fails? – A Classification of Scenarios in Teleoperated Driving," in *13th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, S. 92–96.
- [84] J. Klink, "Teleoperation - When is it Going to Happen?," *ATZ worldwide*, Bd. 123, Rn. 4, S. 70, 2021.
- [85] C. Kettwich und A. Dreler, "Requirements of Future Control Centers in Public Transport," in *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, S. 69–73.
- [86] C. Mutzenich, S. Durant, S. Helman, und P. Dalton, "Updating our understanding of situation awareness in relation to remote operators of autonomous vehicles," (eng), *Cognitive research: principles and implications*, Bd. 6, Rn. 1, S. 9, 2021.
- [87] *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung*, DIN EN ISO 10075-1, 2018.
- [88] C. Schlick, R. Bruder, und H. Luczak, *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [89] C. D. Wickens, J. G. Hollands, S. Banbury, und R. Parasuraman, *Engineering psychology and human performance*. London, New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2016.
- [90] C. D. Wickens, "Multiple resources and performance prediction," *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Bd. 3, Rn. 2, S. 159–177, 2002.
- [91] F. Dehais, A. Lafont, R. Roy, und S. Fairclough, "A Neuroergonomics Approach to Mental Workload, Engagement and Human Performance," *Frontiers in Neuroscience*, Bd. 14, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2020.00268>, 2020.
- [92] B. B. van Acker, D. D. Parmentier, P. Vlerick, und J. Saldien, "Understanding mental workload: from a clarifying concept analysis toward an implementable framework," *Cogn Tech Work*, Bd. 20, Rn. 3, S. 351–365, 2018.
- [93] J. L. Plass und S. Kalyuga, "Four Ways of Considering Emotion in Cognitive Load Theory," *Educational Psychology Review*, Bd. 31, Rn. 2, S. 339–359, 2019.
- [94] M. S. Young, K. A. Brookhuis, C. D. Wickens, und P. A. Hancock, "State of science: mental workload in ergonomics," *Ergonomics*, Bd. 58, Rn. 1, S. 1–17, 2015.

- [95] R. M. Yerkes und J. D. Dodson, "The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation," *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, Bd. 18, Rn. 5, S. 459–482, 1908.
- [96] M. R. Endsley, "Situation awareness global assessment technique (SAGAT)," in *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference*: IEEE, 1988, S. 789–795.
- [97] C. Mutzenich, S. Durant, S. Helman, und P. Dalton, "Situation Awareness in Remote Operators of Autonomous Vehicles: Developing a Taxonomy of Situation Awareness in Video-Relays of Driving Scenes," *Frontiers in Psychology*, Bd. 12, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2021.727500>, 2021.
- [98] V. Linkov und M. Vanžura, "Situation Awareness Measurement in Remotely Controlled Cars," *Frontiers in Psychology*, Bd. 12, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2021.592930>, 2021.
- [99] M. R. Endsley, *Designing for Situation Awareness : An Approach to User-Centered Design: Kapitel 3: SA Demons: The Enemies of Situation Awareness*, 2012.
- [100] L. C. Thomas und C. D. Wickens, "Eye-tracking and Individual Differences in off-Normal Event Detection when Flying with a Synthetic Vision System Display," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 48, Rn. 1, S. 223–227, 2004.
- [101] S. Miller, "Workload Measures: Literature Review," *National Advanced Driving Simulator*, 2001.
- [102] Johanssen, G. and Moray, N. and Pew, R. and Rasmussen, J. and Sanders, A. and Wickens, C, "Final Report of Experimental Psychology Group," in *Mental Workload: Its Theory and Measurement*, N. Moray, Hrsg, Boston, MA: Springer US, 1979, S. 101–114.
- [103] F. A. Muckler und S. A. Seven, "Selecting Performance Measures: "Objective" versus "Subjective" Measurement," *Human factors*, Bd. 34, Rn. 4, S. 441–455, 1992.
- [104] Human Performance Research Group, "NASA Task Load Index (TLX): v. 1.0," 1986.
- [105] A. Pauzie und G. Pachiaudi, "Subjective evaluation of the mental workload in the driving context," in *International Conference on Traffic and Transport Psychology*, 1997.
- [106] K. C. Hendy, K. M. Hamilton, und L. N. Landry, "Measuring Subjective Workload: When Is One Scale Better Than Many?," *Human factors*, Bd. 35, Rn. 4, S. 579–601, 1993.
- [107] Y. Liu und C. D. Wickens, "Mental workload and cognitive task automaticity: an evaluation of subjective and time estimation metrics," *Ergonomics*, Bd. 37, Rn. 11, S. 1843–1854, 1994.
- [108] S. G. Hart, "Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 50, Rn. 9, S. 904–908, 2006.
- [109] M. Gekle *et al*, *Taschenlehrbuch Physiologie*. Stuttgart: Thieme, 2010.
- [110] Kim, Ji-Eun and Lee, Tae-Ho, "Neuroergonomics and Its Relation to Psychophysiology," in *Neuroergonomics: Principles and Practice*, C. S. Nam, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 183–192.

- [111] S. Cohen, D. Janicki-Deverts, und G. E. Miller, "Psychological stress and disease," (eng), *JAMA*, Bd. 298, Rn. 14, S. 1685–1687, 2007.
- [112] D. R. Bach, "Sympathetic nerve activity can be estimated from skin conductance responses - a comment on Henderson et al. (2012)," (eng), *NeuroImage*, Bd. 84, S. 122–123, 2014.
- [113] D. A. T. Siddle, "Effects of stimulus omission and stimulus novelty on dishabituation of the skin conductance response," (eng), *Psychophysiology*, Bd. 23, Rn. 3, S. 309–314, 1985.
- [114] J. S. Packer und D. A. T. Siddle, "Stimulus Miscuing, Electrodermal Activity, and the Allocation of Processing Resources," *Psychophysiology*, Bd. 26, Rn. 2, S. 192–200, 1989.
- [115] M. E. Dawson, A. M. Schell, J. R. Beers, und A. Kelly, "Allocation of cognitive processing capacity during human autonomic classical conditioning," *Journal of Experimental Psychology: General*, Bd. 111, Rn. 3, S. 273–295, 1982.
- [116] M. E. Dawson, A. M. Schell, und D. L. Filion, "The Electrodermal System," in *Handbook of Psychophysiology*, J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, und G. G. Berntson, Hrsg.: Cambridge University Press, 2017, S. 217–243.
- [117] M. Asahina, A. Poudel, und S. Hirano, "Sweating on the palm and sole: physiological and clinical relevance," (eng), *Clinical autonomic research : official journal of the Clinical Autonomic Research Society*, Bd. 25, Rn. 3, S. 153–159, 2015.
- [118] B. Mehler, B. Reimer, und J. F. Coughlin, "Sensitivity of physiological measures for detecting systematic variations in cognitive demand from a working memory task: an on-road study across three age groups," (eng), *Human factors*, Bd. 54, Rn. 3, S. 396–412, 2012.
- [119] D. Ruscio, A. J. Bos, und M. R. Ciceri, "Distraction or cognitive overload? Using modulations of the autonomic nervous system to discriminate the possible negative effects of advanced assistance system," (eng), *Accident; analysis and prevention*, Bd. 103, S. 105–111, 2017.
- [120] S.-H. Seo, S.-H. Kwak, S.-C. Chung, H.-S. Kim, und B.-C. Min, "Effect of distraction task on driving performance of experienced taxi drivers," *Asian Biomedicine*, Bd. 11, Rn. 4, S. 315–322, 2017.
- [121] E. Lutin, R. Hashimoto, W. Raedt, und C. van Hoof, "Feature Extraction for Stress Detection in Electrodermal Activity," in *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, 2021, S. 177–185.
- [122] P. Zontone, A. Affanni, R. Bernardini, A. Piras, und R. Rinaldo, "Stress Detection Through Electrodermal Activity (EDA) and Electrocardiogram (ECG) Analysis in Car Drivers," in *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2019, S. 1–5.
- [123] A. S. Wulvik, H. Dybvik, und M. Steinert, "Investigating the relationship between mental state (workload and affect) and physiology in a control room setting (ship bridge simulator)," *Cogn Tech Work*, Bd. 22, Rn. 1, S. 95–108, 2020.
- [124] Y. Ding, Y. Cao, V. G. Duffy, Y. Wang, und X. Zhang, "Measurement and identification of mental workload during simulated computer tasks with multimodal methods and machine learning," (eng), *Ergonomics*, Bd. 63, Rn. 7, S. 896–908, 2020.

- [125] A. Jimenez-Molina, C. Retamal, und H. Lira, "Using Psychophysiological Sensors to Assess Mental Workload During Web Browsing," *Sensors*, Bd. 18, Rn. 2, <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/458>, 2018.
- [126] Y. Liu und S. Du, "Psychological stress level detection based on electrodermal activity," (eng), *Behavioural brain research*, Bd. 341, S. 50–53, 2018.
- [127] W. Boucsein, "Principles of Electrodermal Phenomena," in *Electrodermal Activity*, W. Boucsein, Hrsg, Boston, MA: Springer US, 2012, S. 1–86.
- [128] W. Boucsein *et al*, "Publication recommendations for electrodermal measurements," (eng), *Psychophysiology*, Bd. 49, Rn. 8, S. 1017–1034, 2012.
- [129] W. Boucsein, "Methods of Electrodermal Recording," in *Electrodermal Activity*, Boston, MA: Springer US, 2012, S. 87–258.
- [130] J. Birjandtalab, D. Cogan, M. B. Pouyan, und M. Nourani, "A Non-EEG Biosignals Dataset for Assessment and Visualization of Neurological Status," in *2016 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SIPS)*: IEEE, Okt. 2016 - Okt. 2016, S. 110–114.
- [131] Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology, "Heart Rate Variability," *Circulation*, Bd. 93, Rn. 5, S. 1043–1065, 1996.
- [132] H.-P. Schuster und H.-J. Trappe, *EKG-Kurs für Isabel*, 4th Aufl.: Georg Thieme Verlag KG, 2005.
- [133] R. Brandes, F. Lang, und R.F. Schmidt, *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [134] F. Shaffer und J. P. Ginsberg, "An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms," (eng), *Frontiers in public health*, Bd. 5, S. 258, 2017.
- [135] T. Heine *et al*, "Electrocardiographic features for the measurement of drivers' mental workload," *Applied Ergonomics*, Bd. 61, S. 31–43, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687016302757>, 2017.
- [136] S. Delliaux, A. Delaforge, J.-C. Deharo, und G. Chaumet, "Mental Workload Alters Heart Rate Variability, Lowering Non-linear Dynamics," *Frontiers in physiology*, Bd. 10, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2019.00565>, 2019.
- [137] R. Castaldo *et al*, "Heart Rate Variability Analysis and Performance during a Repeated Mental Workload Task," in *EMBECC & NBC 2017*, Singapore: Springer Singapore, 2018, S. 69–72.
- [138] A. Tiwari *et al*, "Prediction of Stress and Mental Workload during Police Academy Training Using Ultra-Short-Term Heart Rate Variability and Breathing Analysis," (eng), *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*, Bd. 2020, S. 4530–4533, 2020.
- [139] A. A. G. Samad, M. A. Azizan, M. H. Khairuddin, und M. K. Johari, "Effect of Mental Workload on Heart Rate Variability and Reaction Time of Aircraft Maintenance Personnel," in *Human-Centered Technology for a Better Tomorrow*, Singapore: Springer Singapore, 2022, S. 613–625.

- [140] R. Castaldo, L. Montesinos, P. Melillo, C. James, und L. Pecchia, "Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: a case study on mental stress detection in real life," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, Bd. 19, Rn. 1, S. 1–13, 2019.
- [141] A. R. Hidalgo-Muñoz *et al*, "Respiration and Heart Rate Modulation Due to Competing Cognitive Tasks While Driving," *Frontiers in human neuroscience*, Bd. 12, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2018.00525>, 2019.
- [142] M. Myrtek, D. Weber, G. Brügger, und W. Müller, "Occupational stress and strain of female students: results of physiological, behavioral, and psychological monitoring," *Biological Psychology*, Bd. 42, Rn. 3, S. 379–391, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301051195051686>, 1996.
- [143] Q. Meteier *et al*, "Relevant Physiological Indicators for Assessing Workload in Conditionally Automated Driving, Through Three-Class Classification and Regression," *Frontiers in Computer Science*, Bd. 3, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fcomp.2021.775282>, 2022.
- [144] F. Shaffer, S. Shearman, und Z. M. Meehan, "The Promise of Ultra-Short-Term (UST) Heart Rate Variability Measurements," *Biofeedback*, Bd. 44, Rn. 4, S. 229–233, 2016.
- [145] M. Shakouri, L. H. Ikuma, F. Aghazadeh, und I. Nahmens, "Analysis of the sensitivity of heart rate variability and subjective workload measures in a driving simulator: The case of highway work zones," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Bd. 66, S. 136–145, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814118300313>, 2018.
- [146] E. Teh, S. Jamson, O. Carsten, und H. Jamson, "Temporal fluctuations in driving demand: The effect of traffic complexity on subjective measures of workload and driving performance," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 22, S. 207–217, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847813001344>, 2014.
- [147] V. Moya, E. Slawiński, V. Mut, und E. H. Couto, "Workload detection based on EEG device for teleoperation of a mobile robot," in *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, 2017, S. 1–6.
- [148] H. Courtois, N. Aouf, K. Ahiska, und M. Cecotti, "OAST: Obstacle Avoidance System for Teleoperation of UAVs," *IEEE Trans. Human-Mach. Syst*, Bd. 52, Rn. 2, S. 157–168, 2022.
- [149] T. M. Lam, M. Mulder, M. M. van Paassen, J. A. Mulder, und F. C. T. van der Helm, "Force-Stiffness Feedback in Uninhabited Aerial Vehicle Teleoperation with Time Delay," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Bd. 32, Rn. 3, S. 821–835, 2009.
- [150] J. Y. Chew, M. Kawamoto, T. Okuma, E. Yoshida, und N. Kato, "Adaptive attention-based human machine interface system for teleoperation of industrial vehicle," *Scientific Reports*, Bd. 11, Rn. 1, S. 17284, 2021.
- [151] F. Top, S. Pütz, und J. Fottner, "Human-Centered HMI for Crane Teleoperation: Empirical Study on the Operators' Mental Workload," in *2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 2021, S. 1–13.
- [152] NASA, *Human Integration Design Handbook*, 2014.

- [153] R. Grier, “How High is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores,” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 59, S. 1727–1731, 2015.
- [154] H.-O. Karnath und P. Thier, *Kognitive Neurowissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [155] F. Grehn, *Augenheilkunde*, 30th Aufl. Heidelberg: Springer, 2008.
- [156] Canon Deutschland GmbH, *Canon EOS 90D: Technische Daten*.
- [157] Canon Deutschland GmbH, *Canon EF-S 18-135mm f3.5-5.6 IS USM: Technische Daten*.
- [158] Deutscher Berufsverband der Hals-Nasen-Ohrenärzte e. V., *Das Gleichgewichtsorgan*. [Online] Verfügbar: <https://www.hno-aerzte-im-netz.de/unsere-sinne/ohren/das-gleichgewichtsorgan.html>. Gefunden am: Sep. 10 2022.
- [159] F. Bonato und A. Bubka, “Chromaticity, Spatial Complexity, and Self-Motion Perception,” *Perception*, Bd. 35, Rn. 1, S. 53–64, 2006.
- [160] M. Schweigert, “Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben,” Dissertation, Technische Universität München (TUM), München, 2003.
- [161] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [162] J. P. McIntire, P. R. Havig, und E. E. Geiselman, “Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review,” *Displays*, Bd. 35, Rn. 1, S. 18–26, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938213000929>, 2014.
- [163] F. Scholcover und D. J. Gillan, “Using Temporal Sensitivity to Predict Performance Under Latency in Teleoperation,” *Human factors*, Bd. 60, Rn. 1, S. 80–91, 2018.
- [164] E. Kim, V. Peysakhovich, und R. N. Roy, “Impact of Communication Delay and Temporal Sensitivity on Perceived Workload and Teleoperation Performance,” in *ACM Symposium on Applied Perception 2021*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [165] J. Davis, C. Smyth, und K. McDowell, “The Effects of Time Lag on Driving Performance and a Possible Mitigation,” *IEEE Trans. Robot.*, Bd. 26, Rn. 3, S. 590–593, 2010.
- [166] S. Neumeier *et al*, “Teleoperation: The Holy Grail to Solve Problems of Automated Driving? Sure, but Latency Matters,” in *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019, S. 186–197.
- [167] C. Bachhuber und E. Steinbach, “A system for high precision glass-to-glass delay measurements in video communication,” in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016.
- [168] I. Karl, G. Berg, F. Ruger, und B. Farber, “Driving Behavior and Simulator Sickness While Driving the Vehicle in the Loop: Validation of Longitudinal Driving Behavior,” *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, Bd. 5, Rn. 1, S. 42–57, 2013.
- [169] D. Schitz, G. Graf, D. Rieth, und H. Aschemann, “Model-Predictive Cruise Control for Direct Teleoperated Driving Tasks,” in *2021 European Control Conference (ECC)*, 2021, S. 1808–1813.

- [170] C. Kettwich, A. Schrank, H. Avsar, und M. Oehl, "A Helping Human Hand: Relevant Scenarios for the Remote Operation of Highly Automated Vehicles in Public Transport," *Applied Sciences*, Bd. 12, Rn. 9, <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/9/4350>, 2022.
- [171] M. Walch, "Driver-Vehicle Interaction in Automated Driving," Dissertation, 2021.
- [172] D. Zühlke, *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen*. Dordrecht: Springer, 2012.
- [173] A. Schrank, H. Avsar, C. Kettwich, und M. Oehl, "Safety-Relevant Scenarios for Teleoperated Driving," Okt. 28 2021.
- [174] U. Lipp und I. Sachsenmeier, *Workshops, Seminare und Besprechungen: Mit Kreativität und Methode zum sicheren Erfolg*. Weinheim: Beltz, 2009.
- [175] H. Flitter, M. Niederhuber, und P. Bart, *Systematisches Vorgehen beim Problemlösen: Methoden und Techniken*, 2016.
- [176] H. Schlicksupp, *Innovation, Kreativität und Ideenfindung*, 4th Aufl. Würzburg: Vogel, 1992.
- [177] J. Brown und D. Isaacs, *The World Café: Shaping Our Futures Through Conversations That Matter*. Oakland: Berrett-Koehler Publishers Incorporated, 2005.
- [178] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 12th Aufl. Weinheim: Beltz, 2015.
- [179] R. Bohnsack, *Rekonstruktive Sozialforschung: Einführung in qualitative Methoden*, 9th Aufl. Opladen, Toronto: Verlag Barbara Budrich, 2014.
- [180] J. Feiler und F. Diermeyer, "The Perception Modification Concept to Free the Path of An Automated Vehicle Remotely," in *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2021, S. 405–412.
- [181] D. Kennedy, Á. Hyland, und N. Ryan, *Writing and Using Learning Outcomes: A Practical Guide*: University College Cork, 2007.
- [182] L. W. Anderson *et al*, *A taxonomy for learning teaching and assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*, 2001.
- [183] B.S. Bloom, M.D. Engelhart, E.J. Furst, W.H. Hill, und D.R. Krathwohl, *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals: Handbook 1: Cognitive Domain*. New York: David McKay, 1956.
- [184] D. R. Krathwohl, "A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview," 2002.
- [185] A. J. Romiszowski, "A New Look at Instructional Design. Part II. Instruction: Integrating One's Approach," *British Journal of Educational Technology*, Bd. 13, Rn. 1, S. 15–55, 1982.
- [186] Ying Wang *et al*, "The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing," *Ergonomics*, Bd. 53, Rn. 3, S. 404–420, 2010.
- [187] K. A. Pituch und J. Stevens, *Applied multivariate statistics for the social sciences: Analyses with SAS and IBM's SPSS*, 6th Aufl. New York: Routledge/Taylor & Francis Group, 2016.

- [188] G. van Rossum und F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [189] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Verfügbar: <https://www.R-project.org/>. Gefunden am: Sep. 10 2022.
- [190] *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*, 2013.
- [191] J. Imbsweiler, “Kooperation im Straßenverkehr in innerstädtischen Pattsituationen,” Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2019.
- [192] A. Singandhupe und H. M. La, “A Review of SLAM Techniques and Security in Autonomous Driving,” in *2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, 2019, S. 602–607.
- [193] L. Payá, A. Gil, O. Reinoso, und L. Pancheri, “A State-of-the-Art Review on Mapping and Localization of Mobile Robots Using Omnidirectional Vision Sensors,” *Journal of Sensors*, Bd. 2017, S. 3497650, 2017.
- [194] F. Poggenhans *et al*, “Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving,” in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, S. 1672–1679.
- [195] K. Berntorp, R. Quirynen, T. Uno, und S. Di Cairano, “Trajectory tracking for autonomous vehicles on varying road surfaces by friction-adaptive nonlinear model predictive control,” *Vehicle System Dynamics*, Bd. 58, Rn. 5, S. 705–725, 2020.
- [196] L. Hermansdorfer, J. Betz, und M. Lienkamp, “A Concept for Estimation and Prediction of the Tire-Road Friction Potential for an Autonomous Racecar,” in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019, S. 1490–1495.
- [197] A. Eriksson und N. A. Stanton, “Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control,” *Human factors*, Bd. 59, Rn. 4, S. 689–705, 2017.
- [198] W. J. Horrey und C. D. Wickens, “Driving and Side Task Performance: The Effects of Display Clutter, Separation, and Modality,” *Human factors*, Bd. 46, Rn. 4, S. 611–624, 2004.
- [199] Tomaske, W, Fortmüller, T, “Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellen auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsimulation,” in *Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen*, Gärtner, K.-P, Grandt, M, Hrsg, 2001.
- [200] J. S. Tittle, A. Roesler, und D. D. Woods, “The Remote Perception Problem,” in *Proceedings of the Human Factors And Ergonomics Society 46th Annual Meeting*, 2002, S. 260–264.
- [201] R. Darken, K. Kempster, und B. Peterson, “Effects of Streaming Video Quality of Service on Spatial Comprehension in a Reconnaissance Task,” in *Proceedings of I/ITSEC 2001*, 2001, S. 1–10.
- [202] A. Schimpe, J. Feiler, S. Hoffmann, D. Majstorovic, und F. Diermeyer, “Open Source Software for Teleoperated Driving,” *2022 International Conference on Connected Vehicle and Expo (ICCVE)*, S. 1–6, 2022.

- [203] A. Schimpe, J. Feiler, S. Hoffmann, und D. Majstorovic, *TUM FTM Teleoperated Driving Software*. [Online] Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/teleoperated_driving. Gefunden am: Dez. 08 2021.
- [204] A. Geiger, *Object Tracking Evaluation (2D bounding-boxes)*. [Online] Verfügbar: http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_tracking.php. Gefunden am: Apr. 07 2022.
- [205] S. Sahami und T. Sayed, "How drivers adapt to drive in driving simulator, and what is the impact of practice scenario on the research?," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 16, S. 41–52, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847812000745>, 2013.
- [206] P. Hock *et al*, "How to Design Valid Simulator Studies for Investigating User Experience in Automated Driving: Review and Hands-On Considerations," in *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, S. 105–117.
- [207] B. Brenk, "Entwicklung einer Software zur Ermittlung der Beanspruchung von Operatoren mittels physiologischer Messungen," Semesterarbeit, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [208] PLUX Wireless Biosignals S.A, *BITalino (r)evolution Board Kit BT*. [Online] Verfügbar: <https://bitalino.com/products/board-kit-bt>. Gefunden am: Dez. 09 2021.
- [209] D. Batista *et al*, "Benchmarking of the BITalino biomedical toolkit against an established gold standard," (eng), *Healthcare technology letters*, Bd. 6, Rn. 2, S. 32–36, 2019.
- [210] Cardinal Health, *Kendall Arbo H124SG: Datenblatt*. Verfügbar: <https://shop.medizentra.de/untersuchungslabor/untersuchungslabor-pb/7167/kendall-arbo-einmalelektroden-h124-mit-hydrogel-u.-ag/agci-sensor-30x24mm-50-stck>. Gefunden am: Jan. 05 2022.
- [211] H. F. Posada-Quintero und K. H. Chon, "Innovations in Electrodermal Activity Data Collection and Signal Processing: A Systematic Review," (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Bd. 20, Rn. 2, 2020.
- [212] TIGA-MED Deutschland GmbH, *EKG-Klebeelektrode*. [Online] Verfügbar: <https://www.tiga-med.de/Diagnostik-Geraete/EKG-Elektroden-Zubehoer/EKG-Klebeelektrode-Festgel-50-Stueck-Pack>.
- [213] A. Greco, G. Valenza, A. Lanata, E. P. Scilingo, und L. Citi, "cvxEDA: A Convex Optimization Approach to Electrodermal Activity Processing," (eng), *IEEE transactions on bio-medical engineering*, S. 797–804, 2016.
- [214] S. Gashi *et al*, "Detection of Artifacts in Ambulatory Electrodermal Activity Data," in *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol*, 2020, S. 1–31.
- [215] R. Amin und R. T. Faghieh, "Sparse Deconvolution of Electrodermal Activity via Continuous-Time System Identification," (eng), *IEEE transactions on bio-medical engineering*, Bd. 66, Rn. 9, S. 2585–2595, 2019.
- [216] R. Chu, J. Sharmin Rahman, S. Caldwell, X. Zhu, und T. Gedeon, "Detecting Lies: Finding the Degree of Falsehood from Observers' Physiological Responses," in *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2021, S. 1959–1965.

- [217] E. Di Lascio, S. Gashi, M. E. Debus, und S. Santini, "Automatic Recognition of Flow During Work Activities Using Context and Physiological Signals," in *2021 9th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, 2021, S. 1–8.
- [218] J. Feiler, *Physiological Measurements*. [Online] Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/physiological-measurements>. Gefunden am: Jan. 05 2022.
- [219] Y. Zhang, M. Haghdan, und K. S. Xu, "Unsupervised Motion Artifact Detection in Wrist-Measured Electrodermal Activity Data," Jul. 2017. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/1707.08287v1>.
- [220] S. Taylor *et al*, "Automatic Identification of Artifacts in Electrodermal Activity Data," in *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015.
- [221] M. Kelsey *et al*, "Artifact detection in electrodermal activity using sparse recovery," in *Compressive Sensing VI: From Diverse Modalities to Big Data Analytics*: SPIE, 2017, 102110D.
- [222] I. R. Kleckner *et al*, "Simple, Transparent, and Flexible Automated Quality Assessment Procedures for Ambulatory Electrodermal Activity Data," (eng), *IEEE transactions on biomedical engineering*, Bd. 65, Rn. 7, S. 1460–1467, 2018.
- [223] V. Macefield und G. Wallin, "The discharge behaviour of single sympathetic neurones supplying human sweat glands, *Journal of the Autonomic Nervous System*," 1996.
- [224] The SciPy community, *SciPy: Version 1.7.1*. [Online] Verfügbar: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html. Gefunden am: Jan. 05 2022.
- [225] H. F. S. Gamboa, "Multi-modal behavioral biometrics based on hci and electrophysiology," Ph.D, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [226] S. van Halem, E. van Roekel, L. Kroencke, N. Kuper, und J. Denissen, "Moments that Matter? On the Complexity of using Triggers Based on Skin Conductance to Sample Arousing Events within an Experience Sampling Framework," *Eur J Pers*, Bd. 34, Rn. 5, S. 794–807, 2020.
- [227] D. Makowski *et al*, "NeuroKit2: A Python toolbox for neurophysiological signal processing," *Behavior research methods*, Bd. 53, Rn. 4, S. 1689–1696, 2021.
- [228] F. Shaffer und D. C. Combatalade, "Don't Add or Miss a Beat: A Guide to Cleaner Heart Rate Variability Recordings," *Biofeedback*, Bd. 41, Rn. 3, S. 121–130, 2013.
- [229] Gijsbert Stoet, "PsyToolkit: A Novel Web-Based Method for Running Online Questionnaires and Reaction-Time Experiments," *Teaching of Psychology*, Bd. 44, Rn. 1, S. 24–31, 2017.
- [230] LG Electronics Inc, *LGSVL Simulator*. [Online] Verfügbar: <https://www.svl simulator.com/docs/archive/2020.06/>.
- [231] G. Rong *et al*, "LGSVL Simulator: A High Fidelity Simulator for Autonomous Driving," Mai. 2020. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/2005.03778v3>.
- [232] K. Eilers, F. Nachreiner, und K. Hänecke, "Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung," in 1986, S. 215–224.

- [233] M. Salo, H. Huikuri, und T. Seppänen, “Ectopic Beats in Heart Rate Variability Analysis: Effects of Editing on Time and Frequency Domain Measures,” in Bd. 6, *Annals of noninvasive electrocardiology: The official journal of the International Society for Holter and Noninvasive Electrocardiology* 1st Aufl, 2001, S. 5–17.
- [234] D. Morelli, A. Rossi, M. Cairo, und D. A. Clifton, “Analysis of the Impact of Interpolation Methods of Missing RR-intervals Caused by Motion Artifacts on HRV Features Estimations,” (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Bd. 19, Rn. 14, 2019.
- [235] Acer Inc, *Acer Predator Z321QU: Technischen Daten und Spezifikationen*. Verfügbar: <https://www.displayspecifications.com/de/model/17dd1100>. Gefunden am: Dez. 01 2021.
- [236] M. Masiero, *Acer Predator Z321QU im Test* -. [Online] Verfügbar: <https://www.pc-magazin.de/vergleich/monitor-test-2018-gaming-unter-1000-euro-wqhd-hdr-gsync-freesync-3199727-16868.html>. Gefunden am: Dez. 01 2021.
- [237] Unity Technologies, *Unity*. [Online] Verfügbar: <https://unity.com/>.
- [238] A. Schimpe, S. Hoffmann, und F. Diermeyer, “Adaptive Video Configuration and Bitrate Allocation for Teleoperated Vehicles,” in *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*, 2021, S. 148–153.
- [239] G. Bagschik, T. Menzel, und M. Maurer, “Ontology based Scene Creation for the Development of Automated Vehicles,” in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018, S. 1813–1820.
- [240] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd Aufl. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988.
- [241] S. Holm, “A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure,” *Scandinavian Journal of Statistics*, Bd. 6, Rn. 2, S. 65–70, <http://www.jstor.org/stable/4615733>, 1979.
- [242] D. T. Lykken, R. Rose, B. Luther, und M. Maley, “Correcting psychophysiological measures for individual differences in range,” *Psychological Bulletin*, Bd. 66, Rn. 6, S. 481–484, 1966.
- [243] J. Schoellbauer, S. Sonnentag, R. Prem, und C. Korunka, “I’d rather know what to expect ... Work unpredictability as contemporary work stressor with detrimental implications for employees’ daily wellbeing,” *Work & Stress*, S. 1–18, 2021.
- [244] Johan Engström, Emma Johansson, und Joakim Östlund, “Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 8, Rn. 2, S. 97–120, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847805000185>, 2005.
- [245] B. S. Cham, D. M. Andrei, M. A. Griffin, M. Grech, und A. Neal, “Investigating the joint effects of overload and underload on chronic fatigue and wellbeing,” *Work & Stress*, Bd. 35, Rn. 4, S. 344–357, 2021.
- [246] T. McWilliams und N. Ward, “Underload on the Road: Measuring Vigilance Decrements During Partially Automated Driving,” *Frontiers in Psychology*, Bd. 12, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2021.631364>, 2021.
- [247] R. Parasuraman und G. F. Wilson, “Putting the Brain to Work: Neuroergonomics Past, Present, and Future,” *Human factors*, Bd. 50, Rn. 3, S. 468–474, 2008.

- [248] J. Smallwood und J. W. Schooler, "The restless mind," *Psychological Bulletin*, Bd. 132, Rn. 6, S. 946–958, 2006.
- [249] G. Pepin *et al*, "Do distinct mind wandering differently disrupt drivers? Interpretation of physiological and behavioral pattern with a data triangulation method," *Consciousness and Cognition*, Bd. 62, S. 69–81, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053810017305834>, 2018.
- [250] I. Brishtel *et al*, "Mind Wandering in a Multimodal Reading Setting: Behavior Analysis & Automatic Detection Using Eye-Tracking and an EDA Sensor," *Sensors*, Bd. 20, Rn. 9, <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2546>, 2020.
- [251] R. Grandchamp, C. Braboszcz, und A. Delorme, "Oculometric variations during mind wandering," *Frontiers in Psychology*, Bd. 5, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2014.00031>, 2014.
- [252] N. J. Tasika *et al*, "A Framework for Mind Wandering Detection using EEG Signals," in *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 2020, S. 1474–1477.
- [253] G. Pepin *et al*, "Impact of mind-wandering on visual information processing while driving: An electrophysiological study," *Applied Cognitive Psychology*, Bd. 35, Rn. 2, S. 508–516, 2021.
- [254] F. Dehais, M. Causse, und S. Tremblay, "Mitigation of conflicts with automation: Use of cognitive countermeasures," in Bd. 5, *Human Factors*, 2011.
- [255] N. Régis *et al*, "Formal Detection of Attentional Tunneling in Human Operator–Automation Interactions," *IEEE Trans. Human-Mach. Syst*, Bd. 44, Rn. 3, S. 326–336, 2014.
- [256] G. Matthews, J. de Winter, und P. A. Hancock, "What do subjective workload scales really measure? Operational and representational solutions to divergence of workload measures," *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Bd. 21, Rn. 4, S. 369–396, 2020.
- [257] M. Seitz, "Informationsmanagement im Nutzfahrzeug," Dissertation, Technische Universität München (TUM), 2013.
- [258] M. Friedrich, S. Y. Lee, P. Bates, W. Martin, und A. K. Faulhaber, "The influence of training level on manual flight in connection to performance, scan pattern, and task load," *Cogn Tech Work*, Bd. 23, Rn. 4, S. 715–730, 2021.
- [259] J. Wang, Y. Hu, A. Johnson, H. Tram, und R. Nasri, "System requirements of visualization platform for Wide Area Situation Awareness System," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, S. 1–5.
- [260] Y. Ni, J. Dai, Y. Zhang, Y. Chen, und X. Ma, "Research on Target 3D Reconstruction and Measurement Technology based on Binocular Vision and Lidar," in *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2020, S. 1780–1784.
- [261] M. H. Achmad, W. S. Findari, N. Q. Ann, D. Pebrianti, und M. R. Daud, "Stereo camera — Based 3D object reconstruction utilizing Semi-Global Matching Algorithm," in *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*, 2016, S. 194–199.
- [262] S. Hoffmann, F. Willert, M. Hofbauer, A. Schimpe, und F. Diermeyer, "Quantifying the Influence of Image Quality on Operator Reaction Times for Teleoperated Road Vehicles," in *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems*, 2022, S. 146–154.

- [263] S. Neumeier, S. Stapf, und C. Facchi, “The Visual Quality of Teleoperated Driving Scenarios How good is good enough?,” in *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2020, S. 1–8.
- [264] N. Henze und B. Zirkler, “A class of invariant consistent tests for multivariate normality,” *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Bd. 19, Rn. 10, S. 3595–3617, 1990.
- [265] K. V. Mardia, “Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications,” *Biometrika*, Bd. 57, Rn. 3, S. 519–530, 1970.
- [266] A. P. Field, J. Miles, und Z. Field, *Discovering statistics using R*. London, Thousand Oaks Calif.: Sage, 2012.
- [267] W. Hemmerich, *ANOVA mit Messwiederholung: Voraussetzungen*. [Online] Verfügbar: <https://statistikguru.de/spss/rm-anova/voraussetzungen-3.html>.

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [56] J. Feiler, S. Hoffmann, und F. Diermeyer, "Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet," in *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems*: IEEE, 2020, S. 1–6.
- [180] J. Feiler und F. Diermeyer, "The Perception Modification Concept to Free the Path of An Automated Vehicle Remotely," in *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2021, S. 405–412.
- [13] J.-M. Georg, J. Feiler, F. Diermeyer, und M. Lienkamp, "Teleoperated Driving, a Key Technology for Automated Driving? Comparison of Actual Test Drives with a Head Mounted Display and Conventional Monitors," in *International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2018.
- [202] A. Schimpe, J. Feiler, S. Hoffmann, D. Majstorovic, und F. Diermeyer, "Open Source Software for Teleoperated Driving," *2022 International Conference on Connected Vehicle and Expo (ICCVE)*, S. 1–6, 2022.

Patente

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [79] J.-M. Georg, J. Feiler, S. Hoffmann, und F. Diermeyer, "Sensor and Actuator Latency during Teleoperation of Automated Vehicles," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2020*, 2020.

Dissertationsrelevante Open-Source Software

Feiler, Johannes; Hoffmann, Simon; Schimpe, Andreas; Majstorovic, Domagoj: TUM FTM Teleoperated Driving Software, FTM GitHub, [Online] Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/teleoperated_driving, 24.11.2021, Branch: Perception Modification

Feiler, Johannes: Physiological Measurements, FTM GitHub, [Online] Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/physiological-measurements>, 11.11.2021

Betreute Studienarbeiten

- [64] A. Szpotowicz, "Entwicklung einer Steuerung von teleoperierten, autonomen Fahrzeugen auf Manöverebene," Master-Thesis, Technische Universität München (TUM), München, 2018.
- [207] B. Brenk, "Entwicklung einer Software zur Ermittlung der Beanspruchung von Operatoren mittels physiologischer Messungen," Semesterarbeit, Technische Universität München (TUM), München, 2021.

Anhang

Anhang A	Angabe World-Cafe	xxviii
Anhang B	Voraussetzungen der MANOVA mit Messwiederholung	xxix
Anhang C	Prüfung der Voraussetzungen zur statistischen Auswertung der Situationslösedauer	xxxi
Anhang D	Herleitung der relativen Veränderung der normierten Hautleitwertreaktion	xxxii
Anhang E	Prüfung der Voraussetzungen zur univariaten Auswertung der Beanspruchungsgrößen	xxxiii

Anhang A Angabe World-Cafe

03.12.2019

World-Café, Unzulänglichkeits-Notizzettel

Mit welchen technischen Zusammenhängen lässt sich die Unzulänglichkeit erklären?
Beschreiben Sie die Unzulänglichkeit im Softwareaufbau detailliert!

Unter welchen Umständen tritt diese Unzulänglichkeit auf?

Wie könnte diese Unzulänglichkeit vermieden werden?

Abbildung 8.1: Angabe und Bearbeitungsbogen des World-Cafes

Anhang B Voraussetzungen der MANOVA mit Messwiederholung

Für die obige Berechnung einer parametrischen MANOVA mit Messwiederholung müssen die Daten bestimmten Annahmen genügen. Die Annahmen für eine MANOVA mit Messwiederholung sind nach Pituch die Abwesenheit von Ausreißern [187, S. 13], die Unabhängigkeit der Beobachtungen [187, S. 480] und eine multivariate Normalverteilung [187, S. 480]. Neben den bereits in Abschnitt 7.3.6 ausgeschlossenen Probandenmessungen werden die Messungen einer weiteren Versuchsperson ausgeschlossen, weil dessen DALI-Werte ungewöhnlich große Ausreißer darstellen ($z\text{-Norm}(\text{DALI}(\text{DS})) = 3,32$ und $z\text{-Norm}(\text{DALI}(\text{MMW})) = 3,63$). Die Unabhängigkeit der Beobachtungen ist gegeben, weil die Untersuchungen an den Versuchspersonen einzeln und mit Pausen nacheinander stattgefunden haben. Die multivariate Normalverteilung wird in mehreren Schritten untersucht. Für eine multivariate Normalverteilung muss zunächst in den einzelnen abhängigen Variablen eine univariate Normalverteilung vorliegen. Diese wird mittels des Shapiro-Wilk-Test durchgeführt. Wenn dieser nicht signifikant ist ($p > 0,05$), können die Daten als univariat normalverteilt angenommen werden. Laut Tabelle 5.2 sind die Daten univariat normalverteilt.

Tabelle 8.1: Tests auf univariate Normalverteilung

Variable	Test	p-Wert	Normalverteilt
d_{DS}	Shapiro-Wilk-Test	0,5587	Ja
d_{MMW}	Shapiro-Wilk-Test	0,4315	Ja
$f_{\text{HR, DS}}$	Shapiro-Wilk-Test	0,4398	Ja
$f_{\text{HR, MMW}}$	Shapiro-Wilk-Test	0,6769	Ja
$\sigma_{\text{HP, DS}}$	Shapiro-Wilk-Test	0,5560	Ja
$\sigma_{\text{HP, MMW}}$	Shapiro-Wilk-Test	0,0707	Ja

Anschließend wird über den Henze-Zirkler Test [264] und den Mardias Test [265] die multivariate Normalverteilung untersucht. Nach beiden Tests sind die erhobenen Messgrößen multivariat normalverteilt. Die Ergebnisse der Tests werden in der Tabelle 8.2 und der Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 8.2: Mardias Tests auf multivariate Normalverteilung

Variablen	Testgröße	Testwert	p-Wert	Normalverteilt
$d_{\text{DS}}, f_{\text{HR, DS}}, \sigma_{\text{HP, DS}}$	Schiefe (Skewness)	4,80	0,9043	Ja
$d_{\text{DS}}, f_{\text{HR, DS}}, \sigma_{\text{HP, DS}}$	Wölbung (Kurtosis)	-0,979	0,3277	Ja
$d_{\text{MMW}}, f_{\text{HR, MMW}}, \sigma_{\text{HP, MMW}}$	Schiefe (Skewness)	4,67	0,9120	Ja
$d_{\text{MMW}}, f_{\text{HR, MMW}}, \sigma_{\text{HP, MMW}}$	Wölbung (Kurtosis)	-1,113	0,2659	Ja

Tabelle 8.3: Henze-Zirkler Tests auf multivariate Normalverteilung

Variablen	Test	Testwert	p-Wert	Normalverteilt
d_{DS} , $f_{HR, DS}$, $\sigma_{HP, DS}$	Henze-Zirkler	0,495	0,7998	Ja
d_{MMW} , $f_{HR, MMW}$, $\sigma_{HP, MMW}$	Henze-Zirkler	0,665	0,33129	Ja

Zusammenfassend sind den Werten zufolge die Annahmen für eine parametrische MANOVA mit Messwiederholung erfüllt.

Anhang C Prüfung der Voraussetzungen zur statistischen Auswertung der Situationslösedauer

Für die Berechnung eines gepaarten t-Tests müssen die Daten bestimmten Annahmen genügen. Die Annahmen sind nach Field [266, S. 406] eine normalverteilte Stichprobenverteilung und eine mindestens intervallskalierte abhängige Variable.

Die abhängige Variable ist in diesem Fall die Situationslösedauer, gemessen in Sekunden. Weil es sich dabei um eine quantitative Darstellung von Abständen handelt, ist das Kriterium einer intervallskalierten abhängigen Variablen erfüllt.

Die Normalverteilung kann mittels des Shapiro-Wilk-Tests geprüft werden [266, S. 216]. Wenn dieser nicht signifikant ist ($p > 0,05$), können die Daten als normalverteilt angenommen werden. Zu prüfen sind aufgrund des gepaarten t-Tests die Differenzen der Datenpaare. Vorab werden die Daten mittels der z-Norm auf Ausreißer geprüft [266, S. 180]. Die Überprüfung der z-Norm zeigt an, dass die Daten keine Ausreißer beinhalten. Gemäß des Shapiro-Wilk-Tests sind die Differenzen der Datenpaare normalverteilt ($p = 0,5758$; $W = 0,9739$).

Anhang D Herleitung der relativen Veränderung der normierten Haut- leitwertreaktion

Physiologische Größen unterliegen interindividuellen Schwankungen. Um dennoch Werte zwischen Versuchspersonen vergleichen zu können, ist eine Normierung notwendig. In diesem Abschnitt wird die relative Veränderung einer normierten, physiologischen Größe hergeleitet. Die Verwendung der relativen Veränderung bringt den Vorteil mit sich, dass lediglich ein Minimalwert und kein Maximalwert vorliegen muss. Besonders die Bestimmung der Extremwerte ist ein bekannter Kritikpunkt der Bereichskorrektur [128, S. 1028].

Bereichskorrektur einer physiologischen Größe $x_{i,j}$ der i -ten Versuchsperson für die Werte des Experiments j :

$$x_{i,j,norm} = \frac{x_{i,j} - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}} \quad (8.1)$$

Im Folgenden wird die Berechnung der relativen Veränderung normierter physiologischer Werte einer Versuchsperson i von einem Experiment 1 zu einem Experiment 2 vorgestellt und vereinfacht. Die Experimente 1 und 2 sind in dieser Arbeit die unterschiedlichen Steuerungsarten.

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \frac{x_{i,exp1,norm} - x_{i,exp2,norm}}{x_{i,exp1,norm}} = \frac{\frac{x_{i,exp1} - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}} - \frac{x_{i,exp2} - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}}}{\frac{x_{i,exp1} - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}}} \\ &= \frac{x_{i,exp1} - x_{i,min} - (x_{i,exp2} - x_{i,min})}{x_{i,exp1} - x_{i,min}} \quad (8.2) \\ &= \frac{x_{i,exp1} - x_{i,exp2}}{x_{i,exp1} - x_{i,min}} \end{aligned}$$

Zur Berechnung der relativen Veränderung von einem Experiment 1 zu einem anderen Experiment 2 ist kein Maximalwert notwendig.

Anhang E Prüfung der Voraussetzungen zur univariaten Auswertung der Beanspruchungsgrößen

Analog zum Vorgehen in Anhang C werden für die Standardabweichung der RR-Intervalle σ_{HP} die Annahmen für einen gepaarten t-Test überprüft. Diese sind eine mindestens intervallskalierte abhängige Variable und eine normalverteilte Stichprobenverteilung. Die SDNN bildet quantitative Abstände ab und ist deswegen intervallskaliert. In den Differenzen der Datenpaare treten berechnet nach der z-Norm keine Ausreißer auf. Die Berechnung des Shapiro-Wilk-Tests ergibt, dass die Differenzen der Datenpaare normalverteilt sind ($p = 0,4753$; $W = 0,9684$).

Diese Annahmen wurden auch für die Frequenz der HLW-Reaktionen und die DALI-Werte durchgeführt. Die Frequenz der HLW-Reaktionen besitzt Ausreißer nach der z-Norm und ist gemäß dem Shapiro-Wilk-Test nicht normalverteilt ($p = 0,004$; $W = 0,8909$). Die DALI-Werte haben keine Ausreißer nach der z-Norm und sind gemäß dem Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p = 0,0518$; $W = 0,9327$). Allerdings ist der p-Wert des Shapiro-Wilk-Tests dem Signifikanzniveau von 5 % sehr nahe, weswegen der gepaarte t-Test nicht angewendet wird.

Deswegen wird für die Frequenz der HLW-Reaktionen und die DALI-Werte auf eine ANOVA mit Messwiederholung ausgewichen. Die Annahmen hierfür sind nach Hemmerich [267] die Abhängigkeit der Messungen, eine mindestens intervallskalierte abhängige Variable, ein nominalskaliertes Innersubjektfaktor, das Vorhandensein von Sphärizität, eine für jede Stufe des Innersubjektfaktors etwa normalverteilte abhängige Variable und das Ausbleiben von Ausreißern in den Gruppen.

Zunächst werden die ersten vier Voraussetzungen für die Frequenz der HLW-Reaktionen und die DALI-Werte gemeinsam überprüft. Die Abhängigkeit der Messungen ist aufgrund des Versuchsdesigns gegeben, denn die Versuchspersonen lösen die gleichen Szenarien mit unterschiedlichen Steuerungsarten wiederholt. Die Frequenz der HLW-Reaktionen und die DALI-Werte sind mindestens intervallskaliert, weil es sich dabei um quantitative Größen handelt, die Abstände abbilden. Der Innersubjektfaktor ist die Wahl der Steuerungsart, die folglich kategorial und damit nominalskaliert ist. Sphärizität ist ebenfalls aufgrund des Studiendesigns gegeben, weil nach Field [266, S. 604] bei lediglich zwei Faktorstufen Sphärizität automatisch vorliegt.

Zur Prüfung der Ausreißer wird die z-Norm angewendet. Weder die DALI-Werte noch die Frequenzen der HLW-Reaktionen weisen in ihren Gruppen Ausreißer auf. Zur Überprüfung der Normalverteilung der abhängigen Variablen für jede Stufe des Innersubjektfaktors wird der Shapiro-Wilk-Test herangezogen. Der Test auf Normalverteilung für die Frequenz der HLW-Reaktionen und die DALI-Werte wurde bereits in Anhang B überprüft, weil sie Voraussetzung für eine multivariate Normalverteilung ist. Die Überprüfung war positiv. Folglich darf eine ANOVA mit Messwiederholung für die Analyse der Frequenzen der HLW-Reaktionen und den DALI-Werten herangezogen werden.