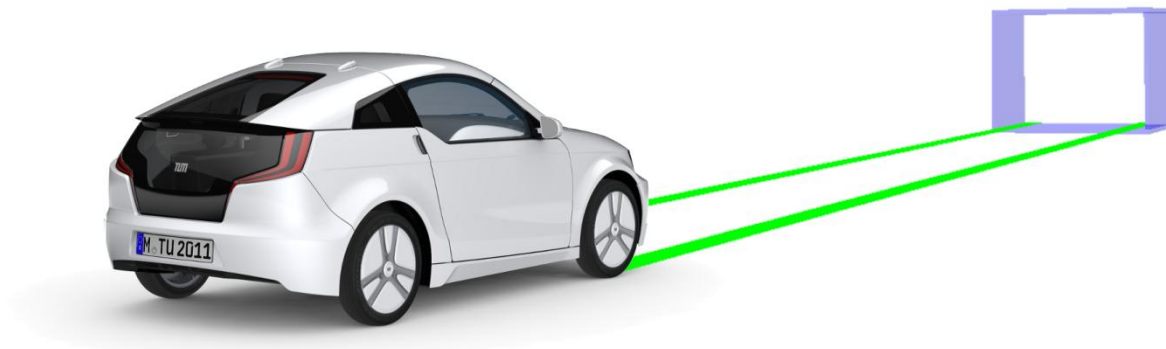


**Konzeption und Evaluierung eines Predictive
Displays bei der Teleoperation von
Straßenfahrzeugen**
Bachelorarbeit



Verfasser: Michael Sauer (Matrikelnr.: 03609938)

Betreuer: Dipl.-Ing. Frederic Chucholowski

Ausgabe: 24.04.2012

Abgabe: 28.09.2012

Bachelorarbeit
für
Herrn Michael Sauer

Konzeption und Evaluierung Prädiktiver Anzeigen bei der Teleoperation von Straßenfahrzeugen

Um beim teleoperierten Fahren den Einfluss von Zeitverzögerungen in der Übertragung auf die Fahrzeugführung zu verringern, kann der Fahrzeugzustand vorausberechnet werden. Die vorausberechnete Position kann daraufhin als „Predictive Display“ in die realen Videobilder mit eingezeichnet werden.

In dieser Arbeit sollen mit Hilfe von DYNAanimation verschiedene Möglichkeiten der Anzeige ausgearbeitet werden. Anschließend soll die Eignung der Anzeige zur Verbesserung der Fahraufgabe anhand einer Probandenstudie evaluiert werden.

Folgende Punkte sind durch Herrn Sauer zu bearbeiten:

- Konzeption verschiedener Anzeigeformen
- Aufbau einer Testumgebung in DYNAanimation
- Entwicklung von Testszenarios für die Probandenstudie
- Konzeption der Probandenstudie
- Durchführung der Probandenstudie
- Evaluation der Anzeige auf Basis der Studienergebnisse

Die Ausarbeitung soll die einzelnen Arbeitsschritte in übersichtlicher Form dokumentieren. Der Kandidat verpflichtet sich, die Bachelorarbeit selbständig durchzuführen und die von ihm verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel anzugeben.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls und darf Dritten nur unter Zustimmung des Lehrstuhlinhabers zugänglich gemacht werden.

Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp Betreuer: Dipl.-Ing. Frederic Chucholowski

Ausgabe: _____ Abgabe: _____

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Garching, 27.09.2012

Michael Sauer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Kurzzeichenverzeichnis.....	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Fragestellung und Zielsetzung	2
1.3 Gliederung der Arbeit.....	3
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Teleoperation.....	4
2.1.1 Allgemeiner Aufbau.....	4
2.1.2 Einsatzgebiete.....	5
2.2 Das Problem der Zeitverzögerung.....	7
2.3 Predictive Display.....	8
2.4 Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen.....	9
3 Entwicklung eines Predictive Displays.....	10
3.1 Tiefenwahrnehmung.....	10
3.2 Gestaltung des Predictive Displays.....	11
3.3 Potentielle Chancen und Risiken.....	13
3.3.1 Chancen.....	13
3.3.2 Risiken.....	17
4 Untersuchungsziel und Hypothesen.....	18
4.1 Predictive Display.....	18
4.2 Vergleich der drei Darstellungsformen.....	19
5 Versuchsdesign.....	21
5.1 Versuchsstrecken.....	21
5.2 Messgrößen.....	22
5.2.1 Objektive Messgrößen.....	22
5.2.2 Subjektive Messgrößen.....	23
5.3 Detaillierung der Hypothesen.....	24
5.3.1 Predictive Display.....	24
5.3.2 Vergleich der drei Darstellungsformen.....	25

Inhaltsverzeichnis

5.4	Fahrsimulatoraufbau	29
5.5	Probandenkollektiv	30
5.6	Versuchsablauf	31
6	Ergebnisse des Fahrversuchs	32
6.1	Aufbereitung der Daten	32
6.2	Allgemeine Ergebnisdarstellung	34
6.3	Überprüfung der Hypothesen	41
6.3.1	Auswertungsmethodik	41
6.3.2	Predictive Display	42
6.3.3	Vergleich der drei Darstellungsformen	43
6.4	Diskussion der Ergebnisse	49
7	Zusammenfassung und Ausblick	51
8	Verzeichnisse	53
8.1	Abbildungsverzeichnis	53
8.2	Tabellenverzeichnis	54
8.3	Literaturverzeichnis	54
9	Anhang	57
9.1	Fragebögen	57
9.2	Daten-CD	60

Kurzzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
t_{sim}	[s]	Simulationszeit
x, y, z	[m]	x,y,z-Koordinaten fahrzeugfester Punkt
v_x, v_y, v_z	[m/s]	x,y,z-Geschwindigkeit fahrzeugfester Punkt
a_x, a_y, a_z	[m/s ²]	x,y,z-Beschleunigung fahrzeugfester Punkt
s	[m]	Zurückgelegter Weg
δ	[rad]	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}$	[rad/s]	Lenkradgeschwindigkeit
q	[m]	Querversatz Fahrzeug
GL	[-]	Gesamtleistung
μ	[-]	Mittelwert
σ	[-]	Standartabweichung
p	[-]	Irrtumswahrscheinlichkeit

1 Einleitung

Der Mensch ermüdet bei langen Autofahrten, ist in verkehrsreichen Situationen häufig überfordert, was bei ihm Stress verursacht, und lässt sich durch den Beifahrer, Musik oder die restliche Umwelt ablenken[1]. All diese Einschränkungen verstärken sich mit der aktuell immer deutlicher zunehmenden Verkehrskomplexität. Ziel muss es also sein den Fahrer in seinen sensorischen und motorischen Fähigkeiten durch technische Errungenschaften zu unterstützen. Dazu dienen Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer in den drei Ebenen der Fahraufgabe nach Donges [2], der Navigation, der Bahnführung und der Stabilisierung, unterstützen. Neben den etablierten Systemen ESP und ABS zur Stabilisierung des Autos, finden immer mehr Systeme Einzug, die in der Bahnführungsebene agieren. Beispiele hierfür sind Autonomous Cruise Control, kurz ACC, das sowohl den Abstand zum Vorfahrenden als auch die eingestellte Geschwindigkeit hält, oder der Lane Keeping Assistant (LKA). Mit zunehmender technischer Entwicklung drängt sich also die Frage auf, ob der Mensch für die Fahraufgabe entbehrlich ist. Automobilhersteller, Zulieferer und auch Forschungseinrichtungen arbeiten intensiv auf dem Gebiet des autonomen Fahrens. Bisher verbietet das Wiener Übereinkommen von 1968 selbstfahrende Autos auf öffentlichen Straßen. Dieses wurde aber nie von den USA unterzeichnet[3]. So hat das Unternehmen Google erst kürzlich für ihr entwickeltes autonomes Fahrzeug eine Straßenzulassung im Bundesstaat Nevada erhalten. Man kann das als eine erweiterte Testumgebung betrachten, da sich trotzdem noch ein Fahrer und Beifahrer im Auto befinden müssen [4] und in Nevada hauptsächlich verkehrsarme Situationen vorherrschen. Auch bei der DARPA Urban Challenge, bei dem Teams aus aller Welt versuchen einen vorgegebenen Weg abzufahren, kam man aufgrund der sehr vereinfachten Bedingungen des Parcours zu der Erkenntnis, dass der „Weg zum automatischen Fahren auf öffentlichen Straßen noch weit“ ist [5].

1.1 Motivation

In den nächsten Jahrzehnten sind autonome Fahrzeuge nur in den Teilbereichen des Straßenverkehrs denkbar, die sich durch eine geringe Komplexität der Situationen auszeichnen. Deshalb ist eine Übergangslösung anzustreben, bei denen auf die menschlichen Fähigkeiten zurückgegriffen wird [6]. Hier eignet sich besonders das teleoperierte Fahren. Bisher nutzt man dieses System, bei dem der Operator einen Roboter fernsteuert, vor allem in gefährlichen und für den Menschen nicht erreichbaren Umgebungen, wobei sich der Mensch die Stärke und Ausdauer von Robotern zu Nutze macht [7]. Besonders seit dem Unglück des japanischen Atomkraftwerks in Fukushima, bei dem ferngesteuerte Roboter zur Erkundung des havarierten Gebietes verwendet wurden, dürfte das System der Teleoperation einer breiteren Masse bekannt sein. Weitere mögliche Einsatzfelder liegen in der Raumfahrt, der Kriegsführung und der Erkundung der Unterwasserwelt.

1 Einleitung

Auch für den öffentlichen Straßenverkehr ist dieses Konzept denkbar. Auf diese Weise nutzt man einerseits zur Regelung des Autos stets die kognitiven und adaptiven Fähigkeiten des Menschen, andererseits ist die physische Präsenz des Operators nicht mehr von Nöten. Diese Kombination ermöglicht die Bildung neuer Anwendungsfelder. Verwendet man diese Technologie beispielsweise bei Taxi-Unternehmen, verhindert man dadurch die oftmals langen Zeiten in denen der Fahrer untätig ist, indem jeweils nur mit Kunden besetzte Taxis von einem Operator betrieben werden. Durch die drahtlose Datenübertragung ist dabei auch eine Steuerung der Fahrzeuge durch Mitarbeiter in Ländern mit geringeren Lohnkosten denkbar. Ein weiteres Anwendungsfeld wäre im Güter- und Fernreiseverkehr möglich. Semi-autonome LKWs oder Busse könnten bei einfachen Verkehrssituationen, wie beispielsweise auf Autobahnen, selbst steuern. Erreichen diese schließlich eine Stadt oder andere komplexe Umgebungen könnte ein Operator die Fahraufgabe übernehmen.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Eine der elementaren Problemstellungen in der Teleoperation ist die Zeitverzögerung. Diese wird durch die Größe der Übertragungsdistanz, der Bandbreite des Mobilfunknetzes und dem Komprimieren und Entpacken der Daten beeinflusst. Die Zeitverzögerung führt dazu, dass der Bediener seine Aktionen und die daraus resultierenden Reaktionen nicht sofort wahrnehmen kann [8]. Bei der Datenübertragung zwischen Fahrer und Fahrzeug soll auf den neu entwickelten Mobilfunkstandard LTE zurückgegriffen werden. Trotz sehr hoher Übertragungsraten kann es zu hohen Zeitverzögerungen von mehreren hundert Millisekunden kommen. Bereits ab einer Verzögerung von 300 Millisekunden ergeben sich deutliche Einschränkungen in der Fahrzeugführung, die eine nicht Beherrschbarkeit gewisser Fahrsituationen zur Folge haben [9].

Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit eine mögliche Darstellungsform für einen sogenannten Predictive Display entwickelt, in einer Probandenstudie untersucht und ausgewertet werden. Bei einem Predictive Display wird mit Hilfe von Augmented Reality dem Benutzer in einem Videobild der zukünftige Zustand des Systems auf Basis von verschiedenen Input-Daten, wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Lenkradwinkel, eingeblendet.

1.3 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 gibt einen Überblick zu den grundsätzlichen Bestandteilen einer Teleoperation und zu den bisherigen Einsatzgebieten. Es wird auf die auftretenden Zeitverzögerungen mit der damit verbundenen Problematik eingegangen. Vor diesem Hintergrund werden der Nutzen und die Funktionsweise eines Predictive Displays erläutert. Den Abschluss bildet das Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen, welches zur Formulierung eines möglichen Lerneffekts benötigt wird.

Kapitel 3 stellt die Entwicklung des Predictive Displays für das teleoperierte Fahren dar, der in den anschließenden Kapiteln Gegenstand der Untersuchungen der Probandenstudie ist. Dabei werden zunächst die menschlichen Schätzmechanismen zur Tiefenwahrnehmung angeführt, auf deren Grundlage das Display gestaltet wird. Zusätzlich werden die damit zusammenhängenden Chancen und Risiken herausgearbeitet.

Kapitel 4 gibt das Untersuchungsziel der Probandenstudie an. Dieses Untersuchungsziel wird in untergeordnete Hypothesen gegliedert, die auf verschiedene Aspekte der Fahrzeugführung und des teleoperierten Fahrens eingehen.

Kapitel 5 enthält das Design der Probandenstudie. Mit den zunächst angeführten Versuchsstrecken und während der Fahrten aufgezeichneten Messgrößen, werden im Anschluss die in Kapitel 4 aufgestellten Hypothesen detailliert. Die restlichen Punkte beinhalten den Aufbau des Fahrsimulators am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, einen Überblick zu den Probanden und den typischen Ablauf des Versuches.

Kapitel 6 besteht aus den gewonnenen Ergebnissen der Fahrversuche. Zu Beginn müssen einige erhaltene Rohdaten mit Hilfe von Matlab-Skripts aufbereitet werden. Mit diesen Informationen werden die Ergebnisse zunächst allgemein dargestellt und die in Kapitel 5 erarbeiteten Hypothesen überprüft. Dabei wird zunächst auf die zugrunde liegende Auswertungsmethodik eingegangen. Zum Abschluss findet eine Diskussion der Ergebnisse statt.

Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit und gibt einen Ausblick für zukünftige Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Predictive Display.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst der allgemeine Aufbau einer Teleoperation und deren bisherige Einsatzgebiete dargestellt. Anschließend wird die Problematik der Zeitverzögerung und der daraus resultierende Predictive Display erläutert. Zuletzt wird auf das Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen eingegangen.

2.1 Teleoperation

Teleoperation bedeutet ganz allgemein gesagt, ein Fahrzeug oder System über eine gewisse Distanz zu steuern, ohne in dem Fahrzeug physisch präsent zu sein. Diese Distanz kann zwischen wenigen Zentimetern bis zu mehreren Millionen Kilometern liegen. Zwar erschienen die ersten teleoperativ gesteuerten Fahrzeuge bereits früher, aber es dauerte noch bis in die siebziger Jahre, bis das System auch ein breiteres Anwendungsgebiet fand. Heutzutage wird die Teleoperation in der Luft, Unterwasser und am Boden verwendet[10].

2.1.1 Allgemeiner Aufbau

Obwohl die Entwicklung in verschiedenen Teilgebieten und unter unterschiedlichen Voraussetzungen stattfand, gibt es unabhängig vom Systemtyp gemeinsame Eigenschaften [10]. Bild 1 zeigt die drei wesentlichen Bestandteile: der Operator, der für die Steuerung der Aufgaben verantwortlich ist, der Teleoperator zum Ausführen der Aufgaben und die Kommunikationsverbindung zum schnellen und sicheren Austausch der Daten.

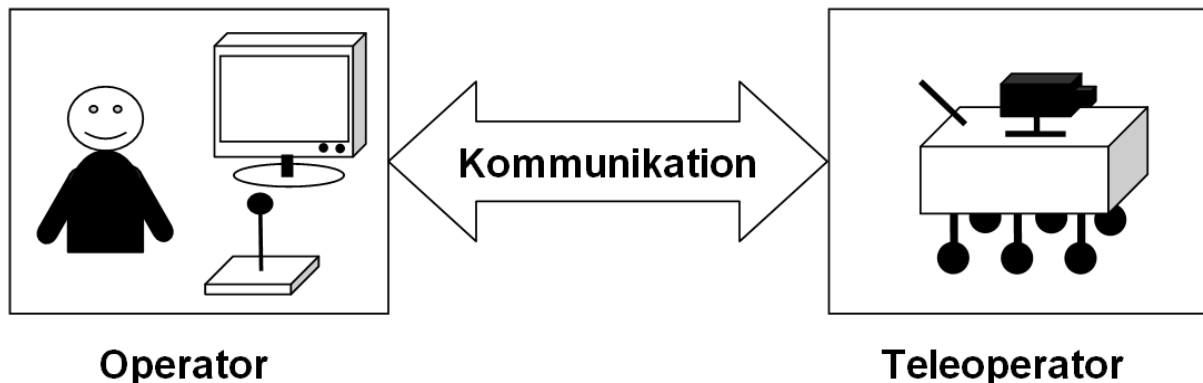


Bild 1: Allgemeiner Aufbau einer Teleoperation

Operator Der Operator erhält die verschiedenen sensorischen Informationen des Teleoperators. Dabei ist bei fast allen Systemen mindestens ein Display zur Anzeige der optischen Signale vorhanden. Oftmals wird dieser noch durch haptisches oder akustisches Feedback erweitert [11]. Mit Eingabehilfen kann der Operator aktiv in die Steuerung eingreifen und so die gewünschten Aufgaben ausführen.

2 Stand der Technik

Teleoperator Der Teleoperator, ein mechanisches System meist in Form eines Roboters, besitzt neben Aktoren, mit denen er sich bewegen und seine Umwelt beeinflussen kann, auch Sensoren, mit denen er seine Umwelt wahrnimmt. Durch das Weiterleiten der sensorischen Informationen an den Operator kann dieser die Situation interpretieren und die nötigen Aktionen ausführen. Somit führt der Teleoperator die gewünschten Tätigkeiten des Operators aus.

Kommunikation Die Kommunikationsverbindung bietet die Plattform auf der die Daten zwischen Operator und Teleoperator ausgetauscht werden. Dies kann sowohl mit einem Kabel, als auch kabellos geschehen. Unabhängig von der Art der Übertragung sind dabei stets eine hohe Datenrate und eine geringe Anzahl von Datenverlusten wichtig. Ist das nicht der Fall kann es zu verfälschten oder verspäteten Datenübertragungen kommen, was letztendlich die Bedienbarkeit des Teleoperators maßgeblich erschwert [11].

2.1.2 Einsatzgebiete

Der Übersichtlichkeit halber gehen die folgenden Ausführungen auf die drei derzeit wichtigsten Einsatzgebiete der Teleoperation ein.

Luftfahrzeuge

Seit dem frühen 20. Jahrhundert gibt es Dronen, die sogenannten Remotely Piloted Vehicles (RPV). Obwohl sie gelegentlich über Radioübertragung kontrolliert wurden, war die Flugroute meist schon vor dem Start eingespeichert. Heutzutage sind die Unmanned Air Vehicles (UAV) die am häufigsten eingesetzten teleoperierten Luftfahrzeuge. Der Operator ist per Radio oder Satellit verbunden und steuert das Fluggerät zur Aufklärung, zur Luftraumüberwachung oder im Kampfeinsatz [10]. So nutzt die USA den von General Atomics hergestellte MQ-1 Predator (Bild 2) zum gezielten Angriff auf feindliche Stützpunkte und Einheiten in umkämpften Gebieten. Im Gegensatz dazu verwendet die Schweiz Dronen vom Typ Ranger (Bild 2) um den Straßenverkehr an Ostern besser regeln zu können [12].



Bild 2: verschiedene Einsatztypen von UAVs, links: MQ-1 Predator [13], rechts: Ranger [12]

Unterwasserfahrzeuge

Remotely Operated Vehicles (ROV) sind unbemannte Unterwasserboote, die meist über Kabelverbindung, zur Energie- und Informationsübertragung, mit einem Schiff oder einer Plattform an der Oberfläche verbunden sind. Vor allem die Ölsuche unter Wasser hat die kommerzielle Entwicklung der Fahrzeuge gefördert. Heutzutage übernehmen die ROVs zunehmend die Aufgaben von bemannten Unterwasserbooten und Tauchern, wie beispielsweise die Entnahme von Bodenproben oder die Inspektion von Ölförderanlagen[10]. Auch zur Erkundung extrem großer, für den Menschen nur schwer erreichbaren, Tiefen werden regelmäßig ROVs verwendet. So ist die Nereus (Bild 3) im Jahr 2009 bis auf eine der tiefsten Stellen des Marianengrabens (10902 m) getaucht [14]. Sie bilden den größten Markt für teleoperierte Fahrzeuge [10].

Bodenfahrzeuge

Teleoperierte Bodenfahrzeuge werden für verschiedene Einsatzzwecke und –szenarien verwendet. Die erste Gruppe von Robotern arbeitet vor allem in Bereichen, die für den Menschen nur schwer zugänglich oder lebensgefährlich sind. Diese umfassen das Entschärfen von Sprengsätzen, der Überprüfung von Kanalrohren bis hin zu der schon angesprochenen Erkundung von nuklear verseuchten Reaktoren.

Rover (Bild 3) dienen der Erkundung von fremden Himmelskörpern wie dem Mond oder Mars. Sie sammeln dabei Bodenproben und liefern den Wissenschaftlern visuelle Eindrücke der Gegend [10]. Um die Energieversorgung über mehrere Jahre hinweg garantieren zu können, werden Photovoltaik-Platten angebracht. Da die Datenübertragungen von wenigen Sekunden bis zu mehreren Stunden lange dauern können arbeiteten die Operatoren nach dem „move and wait“-Prinzip [15].

Unmanned Ground Vehicles (UGV) werden bisher hauptsächlich für militärische Zwecke zur Überwachung und Erkundung von Gebieten verwendet [10] Meist handelt es sich dabei um umgebaute militärische Fahrzeuge.



Bild 3: weitere Anwendungen der Teleoperation, links: ROV Nereus, rechts Rover Opportunity auf dem Mars, aus [14] und [16]

2.2 Das Problem der Zeitverzögerung

Bei Zeitverzögerungen erhält der Nutzer eines teleoperierten Systems auf seiner Bildschirmanzeige ein bereits vergangenes Bild der ferngesteuerten Seite. Er bekommt also kein direktes visuelles Feedback über die Auswirkungen seiner Tätigkeiten. Sheridan spricht die Problematik der Verzögerung der Übertragungssignale in [15] speziell für Teleoperationen im Weltraum und der Tiefsee an, bei denen es zu einer Übertragungsdauer von mehreren Sekunden kommen kann. Es hat sich gezeigt, dass eine kontinuierliche Kontrolle des Kreislaufs der Teleoperation nicht möglich ist und es zu großen Instabilitäten kommt. Um diese Instabilitäten zu vermeiden, wird die „move and wait strategy“ angewendet, bei der der Operator eine sehr kleine Sollvorgabe tätigt, auf die Rückmeldung wartet, wiederum eine minimale Vorgabe ausführt und so weiter. Je nach Zeitverzögerung und Komplexität der Aufgabe kann es so zu unbefriedigend hohen Zeiten für die Ausführung der Aufgaben kommen. Auch beim teleoperierten Fahren, bei dem es zu Verzögerungen von wenigen hundertstel bis zu einer Sekunde kommt, zeigt sich dieses Problem. In [9] wird der negative Einfluss ab 300 Millisekunden auf die laterale und longitudinale Steuerung dargestellt.

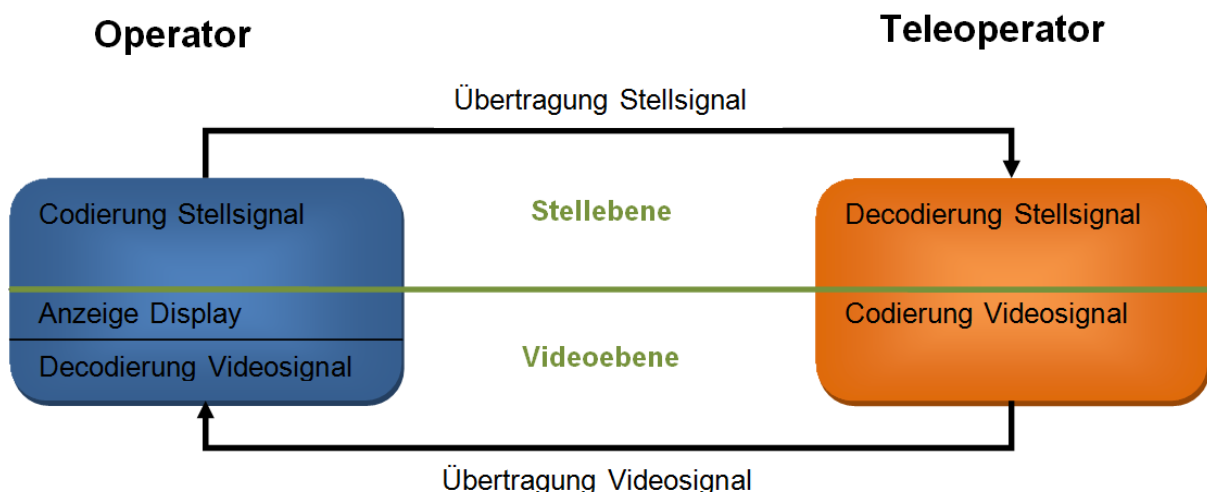


Bild 4: Ursachen der Zeitverzögerung

Die unterschiedlichen Ursachen der Zeitverzögerung werden in Bild 4 illustriert. Auf der Stellebene setzt sich diese aus den einzelnen Verzögerungen der Codierung, Decodierung und Übertragung der Stellsignale zusammen. Auf der Videoebene wiederum aus der Codierung, Decodierung und Übertragung der Videosignale. Die Zeiten für Codierung und Decodierung der Stellsignale liegen in einem Bereich von wenigen Millisekunden und werden im Folgenden vernachlässigt. Die Codierung der Videosignale benötigt durchschnittlich 25 ms, die Decodierung 20 ms. Für die Übertragung der Signale ergeben sich zusammengefasst 120 ms. Auch die Displayanzeige verursacht eine weitere Verzögerung im Bereich von durchschnittlich 20 ms. Diese Zeiten wurden experimentell bei Versuchsfahrten durch den Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik mit dem Netzstandard LTE bestimmt [17]. Die eigentliche Problematik liegt aber in den Spitzen der Verzögerung der Übertragungssignale.

2 Stand der Technik

Wie in Bild 5 zu sehen ist, betragen diese bis zu 1,2 Sekunden. Es kommt vor allem zu Ausschlägen von 300 bis 600 Millisekunden. Um den Einfluss dieser Verzögerungsspitzen zu minimieren und ein möglichst ruckelfreies Videobild zu erhalten, wird die Zeitverzögerung künstlich auf einen Wert von 400 bis 500 Millisekunden gehalten.

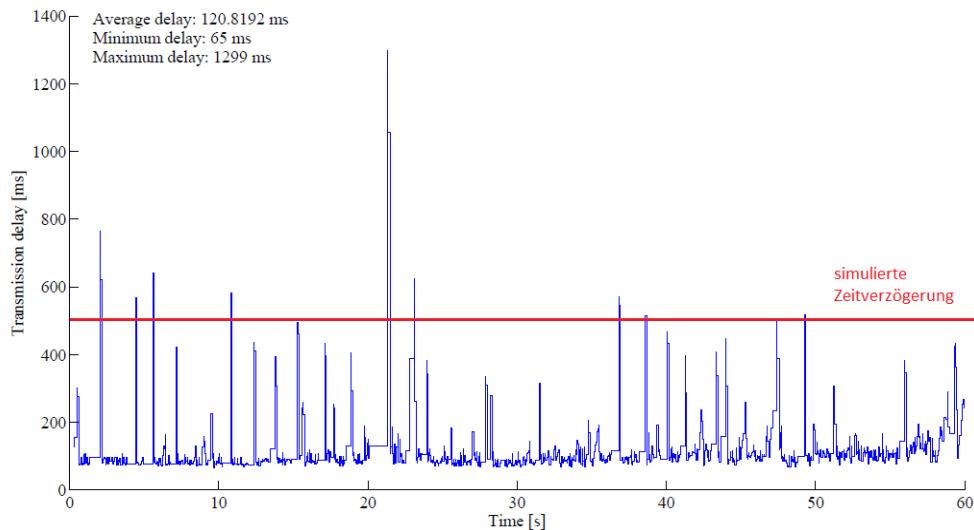


Bild 5: Aufzeichnung Übertragungsverzögerung 3G Netzwerk, aus [18]

2.3 Predictive Display

Die Idee hinter Predictive Displays ist dem Operator die von ihm ausgeführten Bewegungen an der Eingabehilfe mit Hilfe eines virtuellen Repräsentanten des Teleroperators am Display deutlich zu machen. So gewinnt der Nutzer den Eindruck das System agiere ohne Zeitverzögerung, was die Handhabung enorm steigert. Zur gleichen Zeit erhält der Teleoperator die verspäteten Positions- oder Bewegungsdaten, führt die Soll-Bewegung aus und sendet ein Feedback an den Operator [11]. Das Predictive Display hilft also dem Operator, indem es ihm zeigt was mit der gegebenen Ausgangssituation des Teleroboters und den eingegebenen Input-Signalen am Arbeitsplatz passieren wird [15]. In vielen Fällen wird die simulierte Ansicht mit der von der Kamera des Teleoperators aufgenommenen Ansicht überlappt.

Historische Entwicklung

Mit Hilfe der neuen Computertechnologien entwickelte Noyes [19] Mitte der neunziger Jahre das erste Predictive Display. Er überlagerte virtuelle zweidimensionale Linien mit dem Videobild. Als Input-Signale für diese Grafiken wurden die Bewegungssignale, die auch an den Teleoperator gesendet wurden, verwendet. Wartete man nach einer ausgeführten Bewegung genau die Zeitverzögerung der Übertragung ab, konnte man beobachten wie sich das Virtuelle Modell und das Videobild des Teleoperators überlagerten [15]. Die Entwicklung ging dann weiter von simplen Drahtmodellen [15] bis hin zu fotorealistischen prädiktiven Modellen [20].

2.4 Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen

Ein sehr allgemeines Modell der menschlichen Informationsverarbeitung ist das Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten nach Rasmussen. Es zeigt die vom Menschen aufgenommenen Informationen und unterteilt je kognitiver Inanspruchnahme in ein wissensbasiertes, regelbasiertes und fertigkeitsbasiertes Verhalten [21].

In der obersten Ebene steht das wissensbasierte Verhalten (Bild 6). Hier werden Situationen verarbeitet, für die der Mensch bisher keine Handlungsanweisungen gesammelt hat. Um die Aufgabe dennoch zu lösen, werden verschiedene Handlungsalternativen auf der Grundlage von bereits erworbenen und noch zu erlernenden Wissen erstellt und überprüft. Bei der häufigen Anwendung einer dieser Alternativen wird sie in eine Palette von Handlungen aufgenommen und kann in der Ebene des regelbasierten Verhaltens abgerufen werden. In der fertigkeitsbasierten Ebene können durch einen teils lang andauernden Lernprozess Verhaltensmuster gespeichert und automatisch ohne bewusste Kontrolle abgerufen werden. Je nach individueller Erfahrung des Fahrers spielt sich die Fahrzeugführung und – stabilisierung in einer der drei Ebenen ab. So zeigt sich bei einem Fahranfänger zu Beginn hauptsächlich wissensbasiertes Verhalten. Mit zunehmender Fahrpraxis durchlaufen die Handlungen die drei Ebenen, bis sich die Fahraufgabe praktisch vollständig auf der fertigkeitsbasierten Stufe abspielt [22].

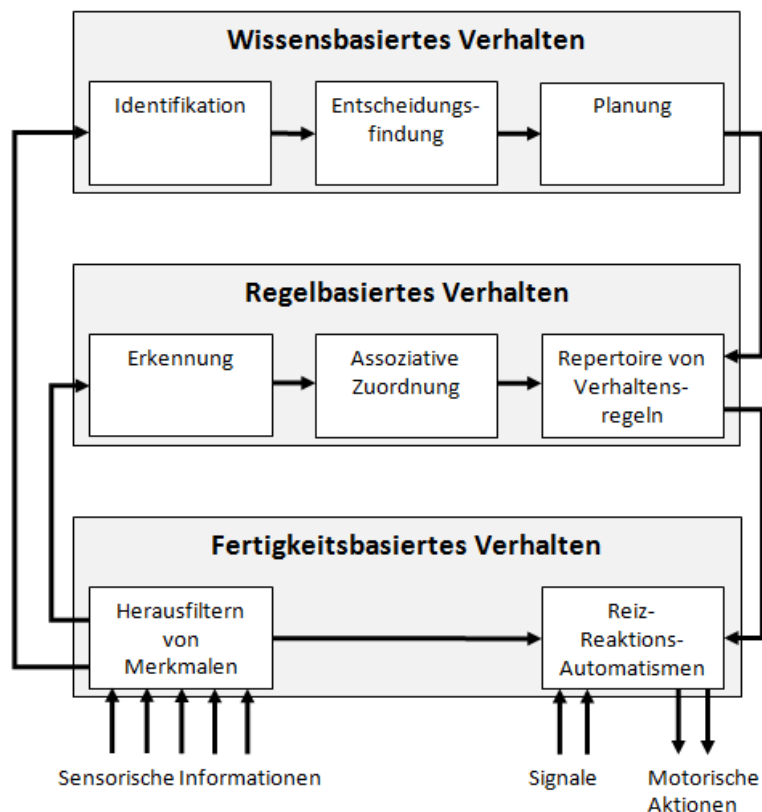


Bild 6: Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen, angelehnt an [21]

3 Entwicklung eines Predictive Displays

In diesem Kapitel werden zunächst allgemeine Theorien zur Tiefenwahrnehmung erläutert. Die Theorien beschreiben, wie der Mensch aus dem zweidimensionalen Bild auf der Netzhaut einen räumlichen Eindruck gewinnt. Auf dieser Grundlage wird im Anschluss das Predictive Display gestaltet. Als Letztes sollen potentielle Chancen und Risiken der entstandenen Anzeige angesprochen werden.

3.1 Tiefenwahrnehmung

Von dem uns umgebenden dreidimensionalen Raum wird ein zweidimensionales Bild auf unserer Netzhaut abgebildet. Um aus diesem Bild wiederum Informationen über die dreidimensionale Tiefe gewinnen zu können, bedient sich das Gehirn verschiedener monokularer Schätzmechanismen [23]. Im Folgenden wird dabei auf die beiden für uns relevanten Mechanismen näher eingegangen: die gewohnte Größe von Gegenständen und die lineare Perspektive.

Bei der Linearperspektive erscheinen zwei parallel verlaufende Kanten sich in weiter Entfernung immer mehr anzunähern und sich letztendlich in einem Punkt zu vereinen. Da der menschliche Verstand aber weiß, dass die Kanten parallel liegen und sich nicht vereinigen, kann er daraus auf die Räumlichkeit und Entfernung der jeweiligen Stellen schließen. Dieses Phänomen lässt sich beispielsweise bei Bahngleisen beobachten. In Bild 7 links ist die Größe der zwei schwarzen Balken auf unserer Netzhaut gleich. Da aber die lineare Perspektive eine Tiefe impliziert, nehmen wir die Balken als unterschiedlich weit entfernt und damit auch als unterschiedlich groß wahr.

Durch unser Wissen um die gewohnte Größe von Gegenständen können wir deren Entfernungen beurteilen. Der Fisch in Bild 7 nimmt die gleiche Größe wie der Mensch in unserem Gesichtsfeld ein. Da wir aber die gewöhnlichen Ausmaße eines Fisches kennen, können wir die unterschiedlichen Entfernungen zuordnen: der Fisch im Vordergrund und der Mensch im Hintergrund.



Bild 7: Monokulare Schätzmechanismen, links: lineare Perspektive, rechts: gewohnte Größe, aus [23]

3 Entwicklung eines Predictive Displays

3.2 Gestaltung des Predictive Displays

Mit den in dem vorangegangenen Abschnitt ausgeführten Grundlagen wird nun ein Predictive Display gestaltet. Das Ziel dabei ist, die zur Erfüllung der Fahraufgabe relevanten Informationen möglichst anschaulich darzustellen. So sind die notwendigen Informationen die Ausmaße des Fahrzeuges und die Position im Raum. An einem Bildschirm erhält das Auge nur ein zweidimensionales Bild der Szene, wodurch das Erreichen des Zieles erschwert wird. Trotzdem lassen sich durch den Einsatz und die Positionierung ausgewählter Geometrien Predictive Displays erstellen, die diese Informationen anschaulich darstellen. Bei der Entwicklung der Anzeige wurde bewusst darauf geachtet nur wenige und möglichst eindeutige Formen zu verwenden. So ist beispielsweise die Darstellung eines transparenten Autos hierfür nicht geeignet. Man erhält eine Fülle an Geometrien, die teilweise auch verdeckt sind. Dadurch hat der Fahrer Probleme, die für ihn wirklich relevanten Elemente herauszufiltern.

Ausmaße

Zunächst soll das fahrzeugfeste Koordinatensystem betrachtet werden (Bild 8). Mit diesen drei Achsen lassen sich die räumlichen Ausmaße eines Fahrzeuges beschreiben.

Zur Fahrzeugführung braucht der Mensch grundsätzlich zwei Informationen über die Größe des Fahrzeuges. Auf der einen Seite die Ausdehnung in y-Richtung, um sich auf der Fahrbahn richtig positionieren oder zwischen zwei Hindernissen hindurchfahren zu können, auf der anderen Seite die Ausdehnung in x-Richtung, um den Abstand zu voraus- und dahinterliegenden Objekten einschätzen zu können. Da die Information über das Ausmaß in negativer x-Richtung nur für das Rückwärtsfahren oder Einparken, bei dem die Zeitverzögerung jeweils relativ geringe Auswirkungen hat, wichtig ist, genügt es alleine die positive x-Richtung darzustellen. Die Angabe in z-Richtung ist zunächst nicht wichtig, da diese Information auch hier nur in Situationen mit relativ geringen Geschwindigkeiten benötigt wird.

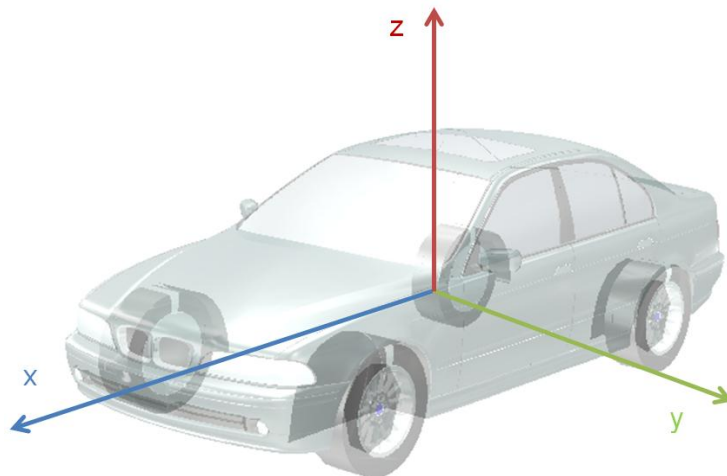


Bild 8: Fahrzeugfestes Koordinatensystem

3 Entwicklung eines Predictive Displays

Position im Raum

Für den Operator ist es wichtig die aktuelle Position des Fahrzeuges im Raum einschätzen zu können. Da er an einem Bildschirm arbeitet und somit kein dreidimensionales Bild zur Verfügung hat, spielen die in Abschnitt 3.1 angesprochenen Aspekte der monokularen Raumwahrnehmung eine wichtige Rolle. Es zeigen sich die gleichen Effekte wie bei der Betrachtung einer zweidimensionalen Abbildung, in unserem Fall also die Bildschirmausgabe. Hierbei sollen die Schätzmechanismen „gewohnte Größe“ und „lineare Perspektive“ in Zusammenhang mit dem Predictive Display gebracht werden.

Gewohnte Größe Aufgrund unseres semantischen Wissens um die Größe eines Fahrzeuges können wir dessen Entfernung einschätzen. Um uns diesen Effekt zunutze zu machen, müssen wir also neben der Ausdehnung des Fahrzeuges in y- und positiver x-Richtung auch die Ausdehnung in z-Richtung darstellen. Auf diese Weise wird die tatsächliche Größe des Autos veranschaulicht und der Fahrer kann dadurch die Position beurteilen.

Lineare Perspektive Auch mit diesem Mechanismus lässt sich ein Hinweis auf die Entfernung und somit Position erstellen. In unserem Fall entstehen die parallelen Linien durch die Spur der beiden Vorderreifen auf der Fahrbahn. Zur Veranschaulichung kann man sich ein Auto vorstellen, das durch eine Pfütze mit Farbe gefahren ist und nun zwei Streifen auf der Straße hinterlässt.

Das Bild 9 stellt den so entstandenen Predictive Display dar. Die beiden Streifen zeigen die Spur der Vorderreifen. Der Rahmen veranschaulicht die Ausdehnung des Fahrzeuges in den relevanten Richtungen. Dabei geben die Kanten die entsprechenden Außenkanten des Fahrzeuges an.

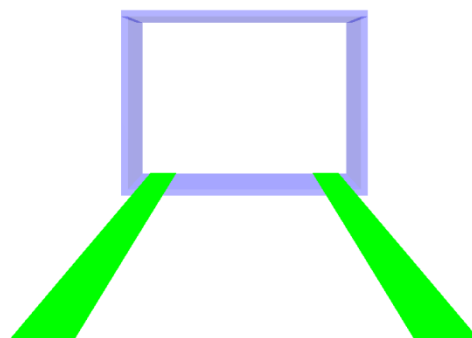


Bild 9: Darstellung des Predictive Displays

Zwei weitere Vorteile ergeben sich durch die Darstellung der Fahrspur und dem Rahmen. Bei Kurvenfahrt zeigt die Spur den Radius der aktuell gefahrenen Kurve und kann dem Fahrer so bei der Bestimmung des Lenkwinkels helfen. Da der Rahmen mit einem fahrzeugfesten Punkt verknüpft ist, wird aus diesem die Wankbewegung des Fahrzeuges ersichtlich.

3 Entwicklung eines Predictive Displays

3.3 Potentielle Chancen und Risiken

Die Fahrzeugführung mit Predictive Display bietet auf der einen Seite Chancen, auf der anderen Seite auch Risiken für Fahrer und Umwelt. Beide Seiten werden in den nachfolgenden Abschnitten betrachtet.

3.3.1 Chancen

Einschätzung der Geschwindigkeit

Bei der Teleoperation ist es für den Operator oftmals schwierig die aktuelle Geschwindigkeit einzuschätzen. Da der Operator nicht im Fahrzeug selbst, sondern in einem meist statischen Simulator sitzt, fehlen ihm wichtige Informationen zur Bewertung der Geschwindigkeit. So erfährt er keine Beschleunigung, spürt keine Vibrationen und hört keine Fahrgeräusche. Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München finden beispielsweise Untersuchungen statt, die sich mit der Vermittlung eines Geschwindigkeitsgefühls beim teleoperierten Fahren durch den sogenannten Motion Blur-Effekt beschäftigen. Dabei werden die Randbereiche der Anzeige je nach Geschwindigkeit verschwommen dargestellt werden. Durch das Predictive Display erhält man ohne zusätzlichen Aufwand einen Hinweis auf die Geschwindigkeit. Bei konstanter Zeitverzögerung variiert der Abstand zwischen dem verzögertem und dem aktuellen, durch die Prädiktion dargestellten, Fahrzeug proportional zur Geschwindigkeit (Bild 10). Je höher diese also ist, desto weiter entfernt liegt das prädierte Fahrzeug. Durch die Anwendung der Schätzmechanismen aus Kapitel 3.1 kann der Fahrer die Entfernung beurteilen und somit auf die aktuelle Geschwindigkeit rückschließen. Wichtig ist es zu erwähnen, dass es sich dabei um relative Geschwindigkeiten handelt.

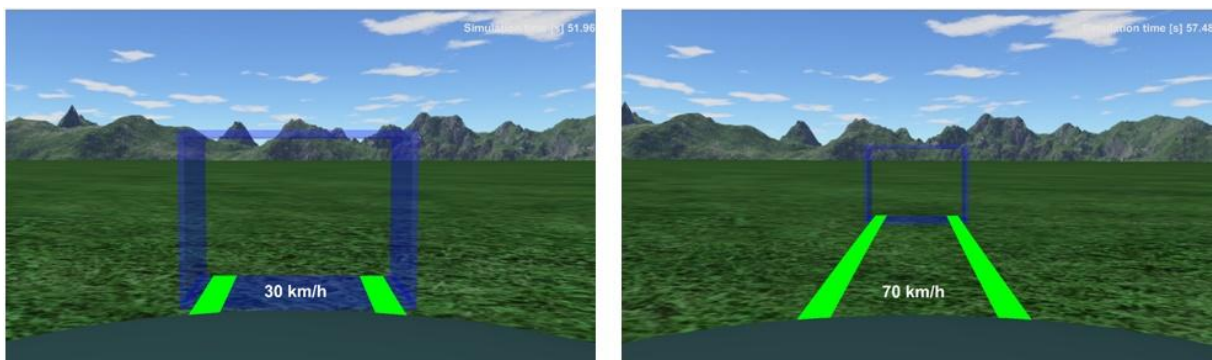


Bild 10: Zwei verschiedene Geschwindigkeiten bei Zeitverzögerung von 500 ms

3 Entwicklung eines Predictive Displays

Erfüllung der Fahraufgabe

In Kapitel 2.2 wird das grundlegende Problem der Zeitverzögerung erläutert. Die Auswirkungen auf die Fahrzeugführung beim teleoperierten Fahren sollen im Folgenden dargestellt werden, wobei sich verschiedene Effekte beobachten lassen.

Ein Problem stellt die zu spät eintretende Reaktion des Operators auf eine Fahrsituation dar. Gelangt der Fahrer beispielsweise an eine Kreuzung oder in einen Kurvenabschnitt, beginnt er erst einzulenken, wenn sich das Fahrzeug im Videobild an der richtigen Stelle befindet. Da die tatsächliche Position des Teleoperators aber schon, je nach Zeitverzögerung und Geschwindigkeit, eine gewisse Distanz voraus ist, erfolgt die Lenkvorgabe zu spät und es wird dementsprechend nicht die gewünschte Spur gehalten. So zeigt sich dieses Problem beispielsweise auch beim positionsgenauen Anhalten an einer Haltelinie. Ein weiterer Effekt ergibt sich durch die verzögerte Rückmeldung von Lenkeingaben am Fahrzeug. Gibt der Operator einen Sollwinkel vor, dauert es der Zeitverzögerung entsprechend bis er das Feedback zu seiner Vorgabe im Videobild erhält. Da das Videobild also nicht die direkte Reaktion des Fahrzeugs wiedergibt, versucht der Fahrer dies durch eine erneute beziehungsweise vergrößerte Sollwinkelvorgabe zu kompensieren. Folglich ist der übermittelte Lenkwinkel zu groß, was zum Übersteuern des Fahrzeuges führt. Versucht der Fahrer daraufhin dieses Übersteuern auszugleichen, lenkt er gegen. Dabei kommt es jedoch zum gleichen Effekt wie eben angesprochen: die fehlende direkte Rückmeldung wird durch einen vergrößerten Lenkwinkel versucht auszugleichen. Das Fahrzeug übersteuert wiederum, diesmal jedoch in die andere Richtung. Dieses Aufschaukeln des Fahrzeugs durch stetiges Übersteuern können die Fahrer meist nur durch Abbremsen auf Schrittgeschwindigkeit wieder kontrollieren [9]. Versucht der Operator zur Vermeidung des Übersteuerns nur kleine Lenkwinkel vorzugeben, muss er mangels direkten Feedbacks meist sehr oft nachkorrigieren um den gewünschten Zustand zu erreichen.

Mit Hilfe des Predictive Displays wird der Fahrer bei der Teleoperation im Umgang mit der Zeitverzögerung unterstützt. Die Anzeige kompensiert alle anfallenden Verzögerungen durch eine Vorausberechnung des Fahrzeugzustandes. Wichtig dabei ist aber die Tatsache, dass das Predictive Display nicht den tatsächlichen Zustand vorausberechnet, das entspräche nur der Zeitverzögerung auf Videoebene, sondern einen zukünftigen Zustand gemäß des zusätzlichen Delays der Stellsignale. So lässt sich auch diese ausgleichen. Tabelle 1 verdeutlicht dabei das Vorgehen.

3 Entwicklung eines Predictive Displays

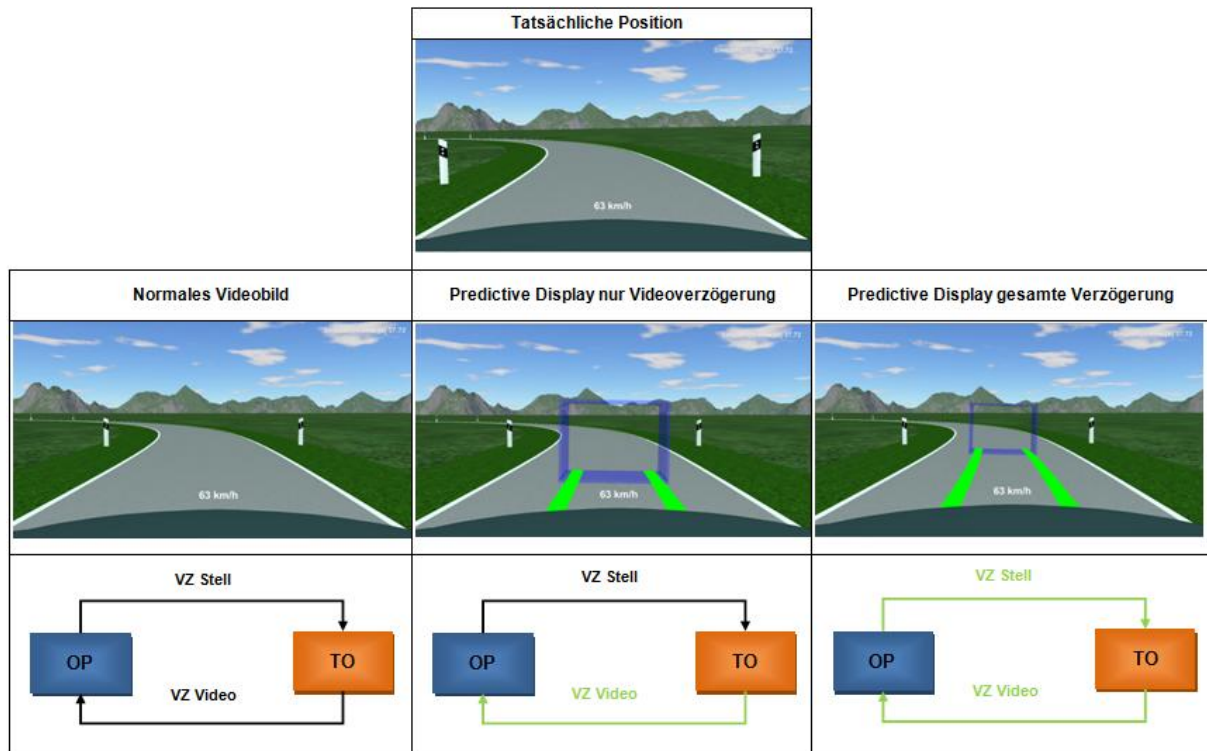


Tabelle 1: Kompensation der Zeitverzögerung durch Predictive Display

Das Bild in der obersten Ebene zeigt die tatsächliche Position des Fahrzeuges. In der zweiten und dritten Ebene wird anhand von unterschiedlichen Anzeigen erläutert, welche Verzögerung jeweils kompensiert wird. In dem vorliegenden Beispiel beträgt der Delay auf Videoebene (VZ Video) 300 Millisekunden und auf Stellebene (VZ Stell) 200 Millisekunden. In der ersten Spalte ist die normale Anzeige abgebildet. Das angezeigte Videobild ist zwar nur 300 ms verzögert, aber der Operator sieht die Reaktion des Fahrzeuges auf seine Eingaben erst nach 200 ms, da zusätzlich noch „VZ Stell“ wirkt. In der zweiten Spalte ist eine Anzeige mit Predictive Display veranschaulicht, bei dem die Position des Fahrzeuges um 300 ms vorausberechnet wird, und es in Echtzeit auf Vorgaben reagiert. Auf diese Weise wird zwar die Zeitverzögerung der Videoebene ausgeglichen, aber VZ Stell wirkt sich immer noch negativ aus. Das vom Fahrer eingegebene Signal, welches zwar für diesen vorausberechneten Fahrzeugzustand passend ist, wird aber erst 200 ms später beim Auto umgesetzt. Somit fährt das Fahrzeug nicht die beabsichtigte Spur. In der dritten Spalte findet eine Vorausberechnung um 500 ms statt. So unterscheidet sich in diesem Fall der Zustand des vorausberechneten Fahrzeuges mit dem tatsächlichen Zustand. Der Predictive Display blickt gewissermaßen in die Zukunft. Auf Grund dessen kann aber auch die Verzögerung der Stellebene kompensiert werden. Gibt der Fahrer beispielsweise einen Lenkwinkel bei Kurveneinfahrt vor, ist zwar das Fahrzeug noch nicht an der vom Predictive Display angezeigten Stelle, aber durch das Wirken von VZ Stell kommt das Signal letztendlich zum richtigen Zeitpunkt beim Auto an. Steuert also der Operator die Anzeige des Predictive Displays lässt sich ein Fahren ohne Zeitverzögerung simulieren.

3 Entwicklung eines Predictive Displays

Entlastung des Fahrers

Wie im vorangegangenen Abschnitt angesprochen, kommt es beim teleoperierten Fahren ohne zusätzliche Anzeige zu einem teils massiven Übersteuern und Aufschwingen des Systems. Um dies zu vermeiden hilft eine kleine Lenkwinkelvorgabe mit stetiger Korrektur. Bild 11 stellt jeweils die Lenkwinkel beim Fahren mit und ohne Zeitverzögerung auf derselben Strecke dar. Dabei ist der verrauschte Verlauf durch die stetige Lenkwinkeländerung und die hohen Lenkwinkel deutlich zu erkennen. Eine weitere Möglichkeit im Umgang mit der Zeitverzögerung ist ein vorausschauendes Fahren. Dabei versucht der Operator in seinen Sollvorgaben die Zeitverzögerung zu berücksichtigen, wie beispielsweise das Lenken in die Kurve, obwohl der Kurveneingang im Videobild noch nicht erreicht ist.

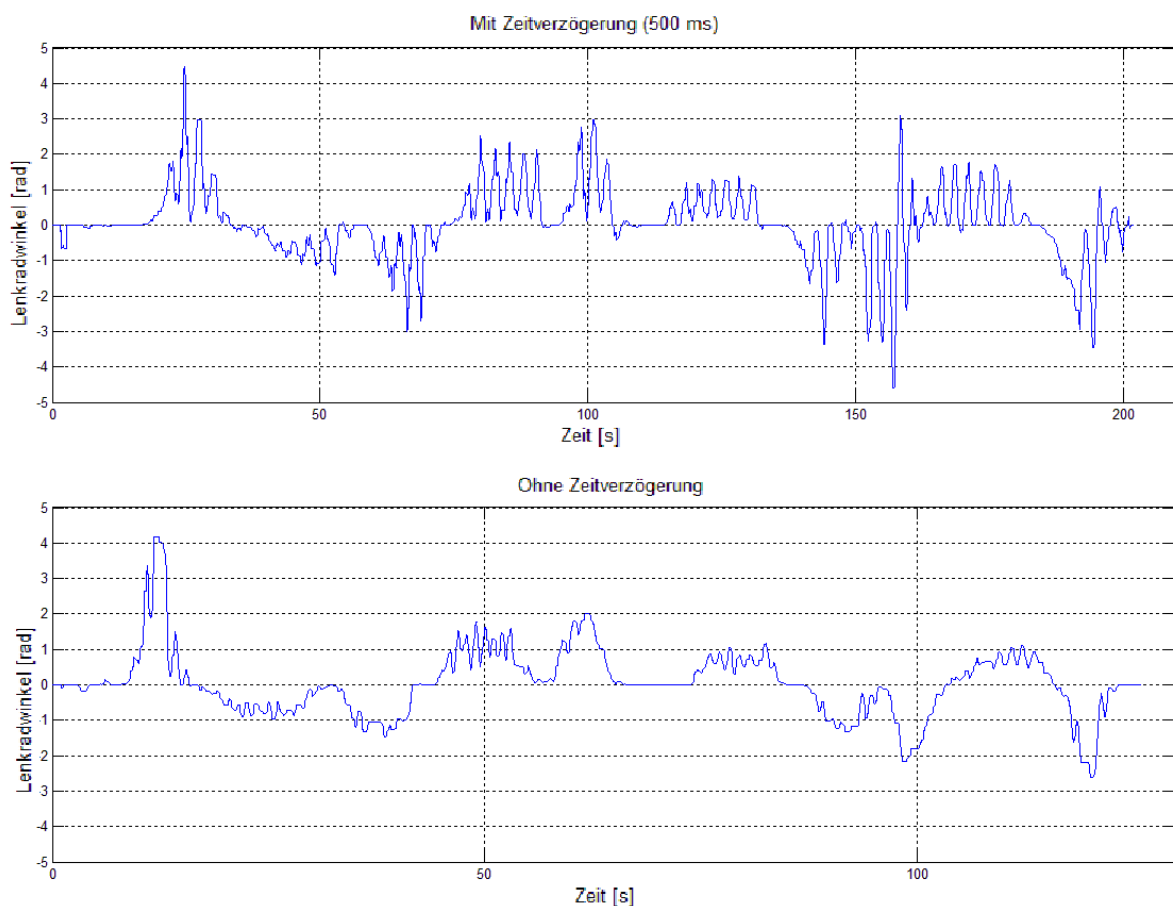


Bild 11: Aufzeichnung Lenkradwinkel mit und ohne Zeitverzögerung

Unabhängig davon welche Methode der Fahrer benutzt, erfordern diese eine erhöhte Konzentration, da dabei das Verhalten nicht automatisiert abläuft. Speziell bei längeren Fahrten kann dies zu einer vermehrten Belastung für den Operator führen.

3 Entwicklung eines Predictive Displays

3.3.2 Risiken

Ein wichtiges Thema bei der Teleoperation ist die Telepräsenz. Sie bedeutet, dass der Operator ausreichend Informationen vom Teleoperator und der Umgebung erhält, um sich physisch anwesend auf der ferngesteuerten Seite zu fühlen [15]. Beim teleoperierten Autofahren fehlen am Operatorarbeitsplatz oftmals die Möglichkeiten Geräusche, Beschleunigungen und Vibrationen darzustellen. So kann der Fahrer fälschlicherweise annehmen, kein reales Auto zu steuern.

Dieses Problem kann sich bei der Teleoperation mit einem Predictive Display noch verstärken. Die Fahrzeugführung wird für den Operator noch abstrakter. Er steuert das Vehikel nicht aus der von ihm gewohnten Perspektive aus dessen Innenraum, sondern aus einer Ansicht ein Stück hinter dem Fahrzeug. Diese Perspektive kennt man sonst nur aus Autorennspielen auf dem PC oder einer Konsole. Auf diese Weise kann der Operator noch mehr das Gefühl verlieren, ein reales Auto zu steuern. Das wirkt sich möglicherweise negativ auf die Risikobereitschaft des Fahrers aus. Ist er sich der Gefahr der aktuellen Situation nicht bewusst, kann die Risikobereitschaft steigen und er Fahrmanöver ausüben, die er unter normalen Umständen nicht durchführen würde.

4 Untersuchungsziel und Hypothesen

Das Untersuchungsziel ist die prinzipielle Tauglichkeit des Predictive Displays beim teleoperierten Autofahren zu zeigen. Außerdem soll ein Vergleich mit zwei anderen Darstellungsformen für das Videobild am Operatorarbeitsplatz gezogen werden. Auf der einen Seite ein Videobild ohne weitere Anzeige (normale Anzeige), auf der anderen Seite ein prädictiertes Videobild (Perfekte Prädiktion). In der Praxis wird dabei das Videobild vorausberechnet und animiert, um so dem Operator ein Videobild ohne Zeitverzögerung darzustellen. Diese Methode ist jedoch extrem aufwendig und bisher noch nicht ausgiebig erforscht. Im Gegensatz dazu ist das Predictive Display relativ einfach umsetzbar. Ziel ist es folglich auch die gleich gute oder bessere Tauglichkeit des Predictive Displays im Vergleich zur Prädiktion des Videobildes zu zeigen.

Die Unterteilung dieser Untersuchungsziele erfolgt in diesem Kapitel anhand von Hypothesen. Die Hypothesen ergeben sich zum größten Teil aus den Kapiteln 2.4 und 3. Es wird dabei einerseits das Predictive Display für sich und andererseits der Vergleich zu den beiden anderen Darstellungsformen betrachtet. Diese allgemeinen Hypothesen werden schließlich in Kapitel 5.3 nach Definition der Messgrößen, die während der Fahrversuche erhoben werden, weiter detailliert.

4.1 Predictive Display

In diesem Abschnitt werden die Hypothesen, die sich nur auf das Display beziehen, formuliert.

Intuitivität

Das in Kapitel 3.2 entwickelte Predictive Display soll für den Nutzer einfach zugänglich sein und die relevanten Informationen ohne explizite Einweisung verständlich darstellen. So soll aus dem Display der aktuelle Fahrzeugzustand, der durch Wank-, Nick-, Gierwinkel, Geschwindigkeit und Lenkwinkel gegeben ist, und die aktuelle Fahrzeugposition ersichtlich sein. Auch wenn in naher Zukunft davon auszugehen ist, dass speziell dafür ausgebildete Fachkräfte die Fahrzeuge teleoperativ steuern werden, ist eine einfache und klar verständliche Darstellung des Predictive Displays für die Fahrzeugführung wichtig. Die Hypothese zur Intuitivität lautet also:

Hypothese IN Die Darstellung des Predictive Displays ist verständlich und zeigt dem Nutzer intuitiv den aktuellen Fahrzeugzustand.

4 Untersuchungsziel und Hypothesen

Fahrzeugführung auf fertigkeitbasierter Ebene

Betrachtet man Kapitel 2.4 mit dem Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen, ist das Ziel eine fertigkeitbasierte Fahrzeugführung mit dem Predictive Display. Da zur Beurteilung Untersuchungen über einen längeren Zeitraum notwendig sind, kann hier nur eine Tendenz des Lerneffektes betrachtet werden.

Hypothese FE Eine fertigkeitbasierte Interaktion bei der Fahrzeugführung mit Predictive Display ist möglich.

4.2 Vergleich der drei Darstellungsformen

In diesem Abschnitt werden die Hypothesen, die einen Vergleich der drei Darstellungsformen ziehen, formuliert. Alle Hypothesen beziehen sich auf die Fahrt unter Zeitverzögerung.

Risikobereitschaft

Ein wesentlicher sicherheitskritischer Aspekt ist die mögliche Erhöhung der Risikobereitschaft des Fahrers (Kapitel 3.3.2). Da er sich selbst nicht im Straßenverkehr befindet, wird ihm ein vermeintliches Bild eines Videospiele am Operatorarbeitsplatz vermittelt. Geht der Fahrer also mehr Risiko als bei einer normalen Autofahrt ein, kann das schwerwiegende Folgen für die anderen Teilnehmer des Straßenverkehrs haben. Für das Predictive Display ist es also wichtig, die Risikobereitschaft im Vergleich zu den anderen beiden Darstellungsformen nicht zu erhöhen. Die Hypothese lautet somit:

Hypothese RB Im Vergleich zu den anderen beiden Darstellungsformen erhöht das Predictive Display die Risikobereitschaft nicht.

Geschwindigkeitsgefühl

Das Geschwindigkeitsgefühl spielt beim teleoperativen Autofahren eine erhebliche Rolle. Wie in Kapitel 3.3.1 angesprochen, kann der variierende Abstand von verzögertem zu präzisiertem Fahrzeug einen Hinweis auf die aktuelle Geschwindigkeit geben. Die Hypothese für das Geschwindigkeitsgefühl lautet folglich:

Hypothese GG Im Vergleich zu den anderen beiden Darstellungsformen verbessert das Predictive Display das Geschwindigkeitsgefühl.

4 Untersuchungsziel und Hypothesen

Entlastung des Fahrers

In Kapitel 3.3.1 wird die erhöhte Belastung des Fahrers beim Fahren unter Zeitverzögerung thematisiert. Um die Sicherheit im Straßenverkehr zu fördern, sollte es das Ziel sein, den Fahrer möglichst wenig zu belasten. Dabei soll sich die Belastung mit Predictive Display bezogen auf die normale Anzeige verringern und bezogen auf die Perfekte Prädiktion nicht erhöhen. Die Hypothesen zur Entlastung des Fahrers lauten:

Hypothese EFa Die Fahrzeugführung mit Predictive Display führt im Vergleich zur normalen Anzeige zu einer geringeren Belastung des Fahrers.

Hypothese EFb Die Fahrzeugführung mit Predictive Display führt im Vergleich zur Perfekten Prädiktion nicht zu einer erhöhten Belastung des Fahrers.

Erfüllung Fahraufgabe

Die Prädiktion soll dem Fahrer helfen mit der Zeitverzögerung umzugehen (Kapitel 3.3.1). Deshalb muss diese zur Erfüllung der Fahraufgabe unter Zeitverzögerung besser als die normale Anzeige geeignet sein. Damit die weitere Arbeit und Entwicklung an der Teleoperation mit Predictive Display sinnvoll ist, ist es essentiell wichtig die ebenbürtige Eignung des Predictive Displays zur Perfekten Prädiktion zu zeigen. Die Hypothesen formulieren sich also wie folgt:

Hypothese FAa Die Fahrzeugführung mit Predictive Display ist besser als die normale Anzeige zur Erfüllung der Fahraufgabe geeignet.

Hypothese FAb Die Fahrzeugführung mit Predictive Display ist nicht schlechter als die Perfekte Prädiktion zur Erfüllung der Fahraufgabe geeignet.

5 Versuchsdesign

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Gestaltung der beiden Versuchsstrecken eingegangen. Daraufhin werden die Messgrößen, die aus den Fahrversuchen erhoben werden, dargestellt. Hier sind objektive Messgrößen durch die Aufzeichnung von dyna4 und subjektive Messgrößen, die sich aus Fragebögen und Bewertungsskalen ergeben, zu unterscheiden. Mittels der so definierten Größen werden die Hypothesen detailliert. Zum Schluss wird noch auf den Aufbau des Fahrsimulators, das Probandenkollektiv und den Versuchsablauf eingegangen.

5.1 Versuchsstrecken

Auf den Versuchsstrecken sollen objektive Messgrößen ermittelt werden, anhand deren sich die Erfüllung der Fahraufgabe bewerten lässt. Um unterschiedliche Szenarien, in denen das teleoperierte Fahren zum Einsatz kommen soll, testen zu können, müssen die Probanden zwei verschiedene Strecken durchfahren. Auf der einen Seite den von [9] übernommenen Handlingkurs. Auf diese Weise kann ein Vergleich zum trajektorienbasierten Steuerungskonzept gezogen werden. Der Kurs stellt eine kurvenreiche Überlandfahrt mit insgesamt zehn Kurven, jeweils fünf links und rechts, und einer Länge von 1750 Metern dar. Zwar ist die Vorgabe für die Probanden, den Kurs möglichst schnell zu durchfahren, aber wichtiger ist es das Fahrzeug innerhalb der vier Meter breiten Fahrbahn zu halten.

Bei der zweiten Strecke, dem Stadtkurs, wird die Komplexität des Szenarios erhöht. Durch den entwickelten Stadtkurs lassen sich die drei Darstellungsformen zusätzlich bei unterschiedlichen Anforderungen vergleichen. Außerdem soll das teleoperierte Fahren hauptsächlich im Stadtverkehr eingesetzt werden, welcher sich bisher noch als problematisch für das autonome Fahren erweist. Der Kurs wurde so gestaltet, dass er ohne Zeitverzögerung gut mit denen für den Stadtverkehr üblichen $50 \frac{km}{h}$ zu durchfahren ist.

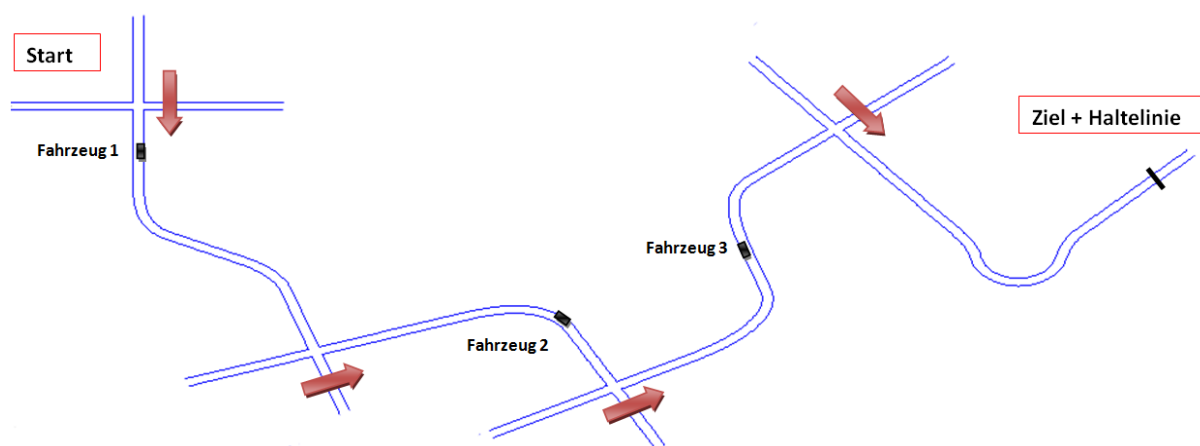


Bild 12: Übersicht Stadtkurs

Er setzt sich aus vier Kreuzungen, jeweils zwei links und rechts, fünf Kurven, einem Kreisverkehr und einer Haltelinie zusammen (Bild 12). Die Fahrbahn ist insgesamt sechs Meter breit, wobei die Probanden sich auf der rechten Fahrbahnspur halten sollen. Die Gebäude

5 Versuchsdesign

der Stadt wurden aus einer frei zugänglichen Google SketchUp-Bibliothek entnommen und in den Editor von dynaAnimation importiert.



Bild 13: Ausschnitt Stadtkurs mit statischem Fahrzeug

Für eine stellenweise Verengung der Fahrbahn wurden an den gekennzeichneten Positionen statische Fahrzeuge platziert (Bild 12 und 13). Diese wurden statisch gewählt, da für den Umgang beim teleoperierten Fahren mit beweglichen Objekten zunächst Untersuchungen in einer getrennten Arbeit notwendig sind. Auch im Stadtkurs lag für die Probanden wieder die Priorität der Spurtreue vor der benötigten Zeit.

5.2 Messgrößen

Bei den Versuchsfahrten werden sowohl objektive als auch subjektive Messgrößen aufgezeichnet. Auf diese Weise kann in der abschließenden Auswertung betrachtet werden, in wie weit sich das persönliche Empfinden mit den gemessenen Werten deckt. Die objektiven Daten ergeben sich aus der Simulation mit dyna4 und die subjektiven Eindrücke aus zwei Fragebögen und zwei Bewertungsskalen.

5.2.1 Objektive Messgrößen

Tabelle 2 beschränkt sich auf die wichtigsten bei den Versuchsfahrten aufgezeichneten Messwerte. Nicht alle Daten werden anschließend ausgewertet, sollen aber nachträglichen Untersuchungen dienen. Aus den x,y,z-Koordinaten werden nach dem Fahrversuch die Spurtreue und der Abstand zur Haltelinie ermittelt. Der fahrzeugfeste Punkt befindet sich in der Mitte der Vorderachse.

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
t_{sim}	[s]	Simulationszeit
x,y,z	[m]	x,y,z-Koordinaten fahrzeugfester Punkt
v_x, v_y, v_z	[m/s]	x,y,z-Geschwindigkeit des fahrzeugfesten Punktes
a_x, a_y, a_z	[m/s ²]	x,y,z-Beschleunigung des fahrzeugfesten Punktes
s	[m]	Zurückgelegter Weg
δ	[rad]	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}$	[rad/s]	Lenkradwinkelgeschwindigkeit

Tabelle 2: Objektive Messgrößen

5 Versuchsdesign

5.2.2 Subjektive Messgrößen

Fragebögen

Die Probanden bekommen jeweils zwei Evaluationsbögen mit Fragen zum Ankreuzen und offenen Fragen. Der erste Fragebogen vor den Fahrversuchen dient der Einordnung der einzelnen Probanden (größtenteils von [9] übernommen). Nach dem Fahrversuch füllen die Probanden einen weiteren Fragebogen aus. Dieser dient neben dem subjektiven Vergleich der drei unterschiedlichen Anzeigen auch der Beurteilung des Predictive Displays mit eventuellen Änderungsvorschlägen. Die Fragen zum Ankreuzen helfen bei der Untersuchung der im Anschluss aufgestellten Hypothesen, die offenen Fragen bei der Weiterentwicklung des Displays.

Bewertungsskalen

Nach jeder Fahrt bewerten die Probanden die Beherrschbarkeit und die aufgetretene Belastung der jeweiligen Anzeigeform. Die Bewertungsskalen orientieren sich dabei an der von Käßler und Pitrella entwickelten ZEIS-Skala [24]. Bei dieser kann der Proband in der ersten Spalte seinen Eindruck zunächst grob einordnen und anschließend in der zweiten Spalte detaillieren. Tabelle 3 zeigt die Skalen für die Beherrschbarkeit und die Belastung.

Beherrschbarkeit		Belastung	
Hoch	10	Hoch	10
	Sehr hoch 9		Sehr hoch 9
	Ziemlich hoch 8		Ziemlich hoch 8
	Etwas hoch 7		Etwas hoch 7
Mittel	Eher hoch als niedrig 6	Mittel	Eher hoch als niedrig 6
	Weder niedrig noch hoch 5		Weder niedrig noch hoch 5
	Eher niedrig als hoch 4		Eher niedrig als hoch 4
Niedrig	Etwas niedrig 3	Niedrig	Etwas niedrig 3
	Ziemlich niedrig 2		Ziemlich niedrig 2
	Sehr niedrig 1		Sehr niedrig 1
	0		0

Tabelle 3: Beherrschbarkeit- und Belastungsskala

5.3 Detaillierung der Hypothesen

Die übergeordneten Hypothesen aus Kapitel 4 werden in diesem Abschnitt in Hinblick auf die während der Fahrversuche ermittelten subjektiven und objektiven Messdaten aus Kapitel 5.2 detailliert. Zusätzlich werden jeweils eine Nullhypothese H_0 und die Alternativhypothese H_A aufgestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung wird im Folgenden für den Mittelwert die Bezeichnung μ verwendet.

5.3.1 Predictive Display

Intuitivität

Die zwei Grundelemente des Predictive Displays sind die Fahrstreifen und der Rahmen. Beide sollen dem Fahrer ohne große Einweisung verständlich sein, den aktuellen Fahrzeugzustand und -position zeigen und bei der Fahrzeugführung helfen. Die Probanden können hierzu im Fragebogen nach dem Fahrversuch die einzelnen Punkte bewerten (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu). Zur Bewertung soll der Mittelwert jeweils kleiner als drei sein.

IN01 Die Fahrspuren helfen den Probanden bei der Fahrzeugführung nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungFahrspur}} \geq 3$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungFahrspur}} < 3$$

IN02 Der Rahmen hilft den Probanden bei der Fahrzeugführung nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungRahmen}} \geq 3$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungRahmen}} < 3$$

IN03 Die Probanden können nicht auf den aktuellen Zustand des Fahrzeuges schließen.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungZustand}} \geq 3$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungZustand}} < 3$$

IN03 Die Probanden können nicht auf die aktuelle Position des Fahrzeuges schließen.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungPosition}} \geq 3$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungPosition}} < 3$$

Fahrzeugführung auf fertigkeitbasierter Ebene

Es soll ein Lerneffekt hinsichtlich des Predictive Displays auf dem Handlingkurs gezeigt werden. Dazu wird die Gesamtleistung (Kapitel 5.3.2) der einzelnen Probanden auf dem Handlingkurs innerhalb der beiden Gruppen A und B, je nachdem ob mit Stadt- oder Handlingkurs begonnen wurde, betrachtet. Auch der subjektive Eindruck der Probanden innerhalb der beiden Gruppen hinsichtlich der Beherrschbarkeit auf dem Handlingkurs kann

5 Versuchsdesign

einen möglichen Lerneffekt zeigen. Zusätzlich wird die Einschätzung der Probanden, ob sie sich mit etwas mehr Übung komplexere und unbekannte Szenarien zutrauen, ausgewertet.

FE01 Die mit dem Predictive Display erzielten Gesamtleistungen der Probanden A und B unterscheiden sich auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{GesamtleistungHandlingkursGruppeA(Predictive Display)}} = \mu_{\text{GesamtleistungHandlingkursGruppeB(Predictive Display)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{GesamtleistungHandlingkursGruppeA(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{GesamtleistungHandlingkursGruppeB(Predictive Display)}}$$

FE02 Die Einstufungen der Beherrschbarkeit des Predictive Displays durch die Probanden A und B unterscheiden sich auf dem Handlingkurs nicht

$$H_0: \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkursGruppeA(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkursGruppeB(Predictive Display)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkursGruppeA(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkursGruppeB(Predictive Display)}}$$

FE03 Auch mit mehr Übung trauen sich die Probanden komplexere, unbekannte Szenarios mit dem Predictive Display nicht zu.

$$H_0: \mu_{\text{UnbekannteSzenarien(Predictive Display)}} \geq 3$$

$$H_A: \mu_{\text{UnbekannteSzenarien(Predictive Display)}} < 3$$

5.3.2 Vergleich der drei Darstellungsformen

Risikobereitschaft

Zur Untersuchung der Risikobereitschaft werden die subjektiven Eindrücke der Teilnehmer durch den Fragebogen nach dem Fahrversuch betrachtet. Wichtig dabei ist, dass die Probanden nicht das Gefühl vermittelt bekommen, kein reales Auto zu steuern und dass das Predictive Display nicht die Risikobereitschaft im Vergleich zu den anderen beiden Anzeigeformen steigert.

RB01 Das Gefühl ein reales Auto zu steuern unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungRealesAuto(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungRealesAuto(normale Anzeige)}}$$

RB02 Das Gefühl ein reales Auto zu steuern unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungRealesAuto(Perfekte Prädiktion)}}$$

RB03 Die Risikobereitschaft unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(normale Anzeige)}}$$

5 Versuchsdesign

RB04 Die Risikobereitschaft unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungRisikobereitschaft(Perfekte Prädiktion)}}$$

Geschwindigkeitsgefühl

Auch zur Bewertung des Geschwindigkeitsgefühls werden die subjektiven Eindrücke der Teilnehmer durch den Fragebogen nach dem Fahrversuch untersucht. In Kapitel 3.3.1 wurde dabei die Hilfestellung zur Einschätzung der Geschwindigkeit durch den variierenden Abstand zwischen verzögertem Fahrzeug und Predictive Display herausgearbeitet. Daraus lässt sich ein möglicher Vorteil für dieses ableiten.

GG01 Der Eindruck der Probanden zur Einschätzung der Geschwindigkeit mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur normalen Anzeige nicht.

$$H_0: \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Predictive Display)}} = \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(normale Anzeige)}}$$

GG02 Der Eindruck der Probanden zur Einschätzung der Geschwindigkeit mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur Perfekten Prädiktion nicht.

$$H_0: \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Predictive Display)}} = \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{EinschätzungGeschwindigkeit(Perfekte Prädiktion)}}$$

Entlastung des Fahrers

Bei der Belastung der Fahrer wird einerseits die subjektive Bewertung nach jeder Fahrt betrachtet, andererseits die Anzahl der Lenkrichtungswechsel innerhalb der einzelnen Fahrten. Wie in Kapitel 3.3.1 herausgearbeitet wurde, soll das Predictive Display den Fahrer im Vergleich zur normalen Anzeige entlasten, im Vergleich zur Perfekten Prädiktion soll sich die Höhe der Belastung nicht unterscheiden. Möchte man den Fahrer entlasten, muss auch die Anzahl der Lenkrichtungswechsel geringer als bei der normalen Anzeige sein, beziehungsweise sich zur Perfekten Prädiktion nicht unterscheiden. Es werden dabei stets Stadt- und Handlingkurs getrennt voneinander betrachtet.

EF01 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(normale Anzeige)}}$$

5 Versuchsdesign

EF02 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungBelastungStadtkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

EF03 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(normale Anzeige)}}$$

EF04 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BewertungBelastungHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

EF05 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur normalen Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(normale Anzeige)}}$$

EF06 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur Perfekten Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht..

$$H_0: \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AnzahlLRWStadtkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

EF07 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur normalen Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(normale Anzeige)}}$$

EF08 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur Perfekten Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AnzahlLRWHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

Erfüllung Fahraufgabe

Die Probanden nutzen zur Absolvierung der Strecken zwei verschiedene Vorgehensweisen: es fällt auf, dass der eine Teil sehr schnell bei Vernachlässigung der Spurtreue fährt, der andere Teil hält die Spurtreue ein, benötigt aber verhältnismäßig mehr Zeit für den Kurs. Aus diesem Grund wird eine Gesamtleistung definiert, um eine Vergleichbarkeit der beiden Probandengruppen herzustellen. Damit eine Weiterentwicklung des Predictive Displays sinnvoll ist, muss die Gesamtleistung besser als bei der normalen Anzeige sein und

5 Versuchsdesign

gleichzeitig nicht schlechter als bei der Perfekten Prädiktion. Auch hier wird der subjektive Eindruck der Probanden hinsichtlich der Beherrschbarkeit untersucht. Es gelten wiederum die Anforderungen, die auch an die Gesamtleistung gestellt werden. Um auch einen Vergleich auf der Ebene der longitudinalen Steuerung treffen zu können, wird der Abstand zur Haltelinie betrachtet. Dieser muss mit dem Predictive Display geringer als bei der normalen Anzeige sein und nicht höher als bei der Perfekten Prädiktion.

FA01 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{GLStadtkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{GLStadtkurs(normale\ Anzeige)}$$

$$H_A: \mu_{GLStadtkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{GLStadtkurs(normale\ Anzeige)}$$

FA02 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{GLStadtkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{GLStadtkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

$$H_A: \mu_{GLStadtkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{GLStadtkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

FA03 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{GLHandlingkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{GLHandlingkurs(normale\ Anzeige)}$$

$$H_A: \mu_{GLHandlingkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{GLHandlingkurs(normale\ Anzeige)}$$

FA04 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{GLHandlingkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{GLHandlingkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

$$H_A: \mu_{GLHandlingkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{GLHandlingkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

FA05 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(normale\ Anzeige)}$$

$$H_A: \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(normale\ Anzeige)}$$

FA06 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

$$H_0: \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

$$H_A: \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{BeherrschbarkeitStadtkurs(Perfekte\ Prädiktion)}$$

FA07 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Predictive\ Display)} = \mu_{BeherrschbarkeitHandlingkurs(normale\ Anzeige)}$$

$$H_A: \mu_{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Predictive\ Display)} \neq \mu_{BeherrschbarkeitHandlingkurs(normale\ Anzeige)}$$

5 Versuchsdesign

FA08 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

$$H_0: \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Predictive Display)}} = \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{BeherrschbarkeitHandlingkurs(Perfekte Prädiktion)}}$$

FA09 Der Abstand zur Haltelinie mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur normalen Anzeige nicht.

$$H_0: \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AbstandHaltelinie(normale Anzeige)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AbstandHaltelinie(normale Anzeige)}}$$

FA10 Der Abstand zur Haltelinie mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur Perfekten Prädiktion nicht.

$$H_0: \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Predictive Display)}} = \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Perfekte Prädiktion)}}$$

$$H_A: \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Predictive Display)}} \neq \mu_{\text{AbstandHaltelinie(Perfekte Prädiktion)}}$$

5.4 Fahrsimulatoraufbau

Bild 14 zeigt den Aufbau des statischen Fahrsimulators für die Versuchsreihe am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Am Operator-Arbeitsplatz sind drei Monitore (1) zur Darstellung der Simulation, ein G25 Logitech Racing Wheel (2) mit seiner Schaltung und der Pedalerie zur Steuerung des Fahrzeugs sowie ein üblicher Autositz (3) angebracht. Bei den Fahrten verwenden die Probanden lediglich das Lenkrad, Gas- und Bremspedal, da der Gangwechsel automatisch erfolgt. Der Versuchsleiter kann über den zusätzlich vorhandenen vierten Monitor (4) die Simulation steuern, Parameter einstellen und die Aufzeichnung der Messdaten regeln.

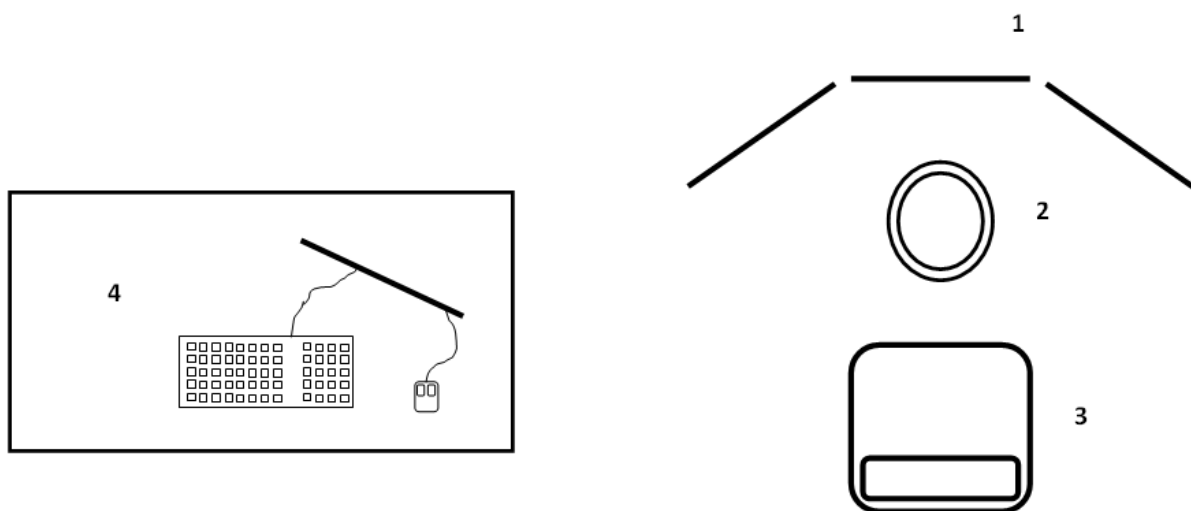


Bild 14: Aufbau des Fahrsimulators

5 Versuchsdesign

5.5 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv setzt sich aus 22 Studenten und Doktoranten der Technischen Universität München im Alter von 21 bis 35 Jahren ($\mu = 24,91$) zusammen. Mit lediglich einer weiblichen Teilnehmerin zeigt sich die übliche Aufteilung an Technischen Universitäten. Aufgrund der Tatsachen des ähnlichen technischen Hintergrundes der Probanden und der Voraussetzung des Besitzes des Führerscheins Klasse B, ist die Repräsentativität der Stichprobe nicht gegeben. Vor dem Hintergrund, in dieser Studie lediglich Tendenzen nachweisen zu wollen, welche mit umfangreicheren Tests zusätzlich untersucht werden müssen, stellt die Auswahl der Probanden kein Problem dar. Bild 15 gibt einen Überblick der Probanden zu deren Fahrleistung, Fahrstil, Erfahrungen mit Fahrsimulatoren und Computerspielen.

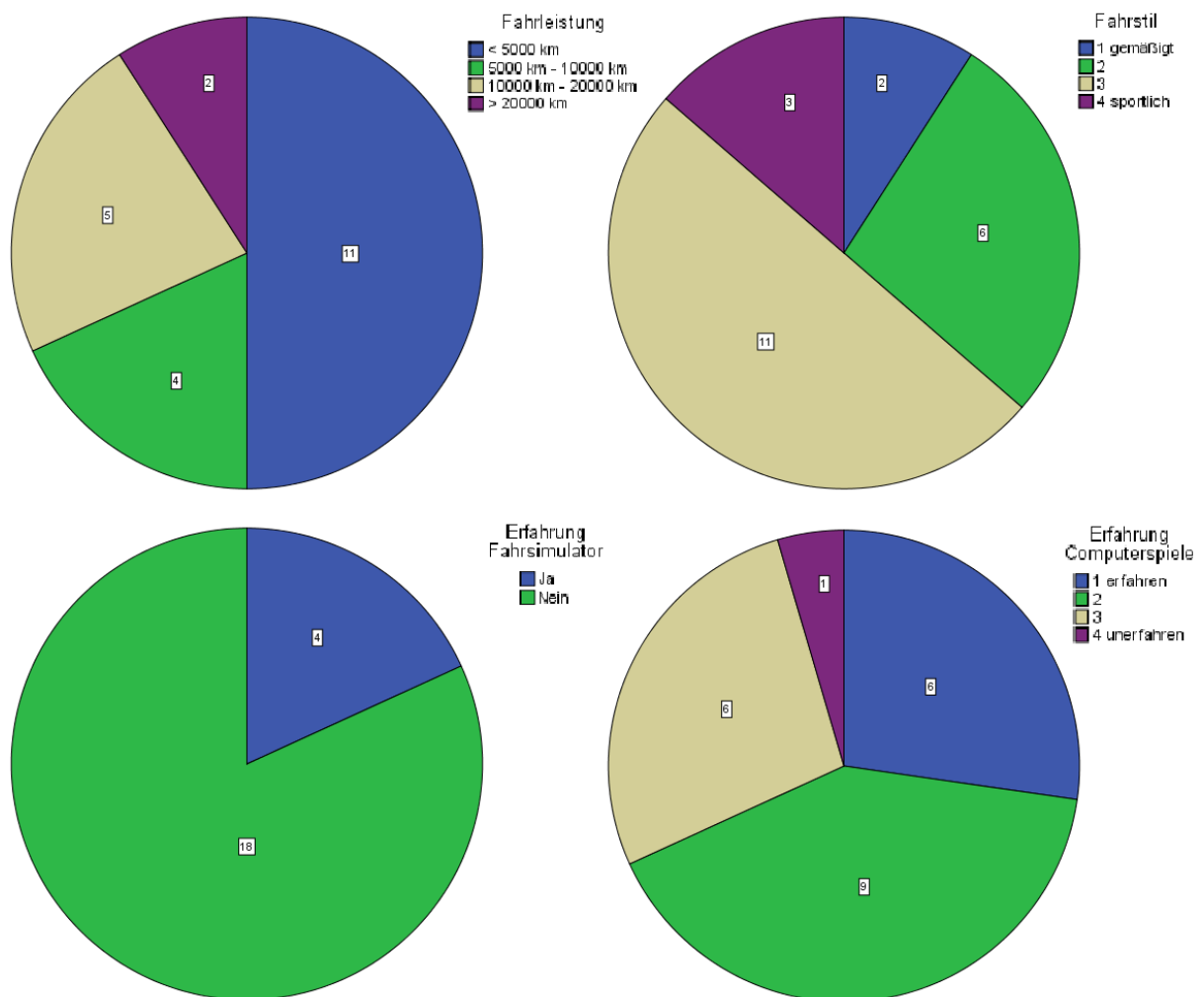


Bild 15: Überblick Probandenkollektiv

5.6 Versuchsablauf

Nachdem die Probanden vom Versuchsleiter am Fahrsimulator empfangen wurden, nehmen die Probanden auf dem Fahrersitz Platz. Zunächst werden die Teilnehmer in die Thematik des teleoperierten Fahrens und in die Funktionsweise von Predictive Displays eingeführt. Nach Klärung offener Fragen werden der Versuchsablauf und die Bedienung des Simulators erläutert. Zu Beginn füllt jeder Proband den ersten Fragebogen aus und fährt sich anschließend auf beiden Strecken mit jeder Anzeigeform ein, wobei mit dem Handlingkurs begonnen wird und die Reihenfolge der Anzeigen normale Anzeige, Predictive Display und Perfekte Prädiktion ist. So soll den Teilnehmern ein Szeneverständnis vermittelt werden, um die Auswirkungen eines sich steigernden Verständnisses der Strecken während der Versuchsfahrten ausschließen zu können. Außerdem hat sich bei Probedurchläufen gezeigt, dass vor allem bei der normalen Anzeige ein Einfahren vor den eigentlichen Versuchsfahrten wichtig ist, da die ersten Minuten meist durch extremes Fahren in Schlangenlinien geprägt waren und somit die Betrachtung der Spurtreue wenig aussagekräftig gewesen wäre. Die Zeitverzögerung beträgt jeweils 500 Millisekunden, wobei für die Darstellung der Perfekten Prädiktion ein unverzögertes Signal verwendet wird. In der auf das Einfahren folgenden fünfminütigen Pause wird den Probanden die Benutzung der Bewertungsskalen erläutert. Dann beginnen die eigentlichen Versuchsfahrten mit der Aufzeichnung der Messdaten. Dabei werden zwei Gruppen unterschieden, je nachdem mit welchem Kurs begonnen wird. Auf diese Weise kann in der anschließenden Auswertung ein möglicher Lerneffekt beobachtet werden. Zusätzlich werden die Reihenfolgen der Anzeigeformen innerhalb der jeweiligen Strecke permutiert um Abhängigkeiten zu vermeiden. Die Teilnehmer füllen nach jeder Fahrt den Bewertungsbogen über die Beherrschbarkeit und Belastung und den Fragebogen am Ende aller Fahrten aus. Letztendlich ergeben sich für jeden Probanden 12 Fahrten, jeweils sechs für das Einfahren und die Versuchsfahrten.

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Zunächst wird auf die Bestimmung der Spurtreue, der Anzahl der Lenkrichtungswechsel und der Gesamtleistung aus den während der Simulation aufgezeichneten Messdaten näher eingegangen. Zur Vermittlung eines ersten Überblicks werden die Ergebnisse im Anschluss grafisch dargestellt. Bevor letztendlich die in Kapitel 5.3 aufgestellten Hypothesen untersucht werden, wird die zugrunde liegende Auswertungsmethodik erläutert. Zum Abschluss findet eine Interpretation der Auswertung statt.

6.1 Aufbereitung der Daten

Ein selbst programmiertes Matlab-Skript generiert nach den Versuchsfahrten aus den Messgrößen die relevanten Daten. Hierzu soll auf die Bestimmung der Spurtreue näher eingegangen werden. Zusätzlich dient die von Nate Yoder programmierte Funktion PeakFinder [25] zur Untersuchung des aufgezeichneten Lenkradwinkels. Abschließend wird die Bestimmung der Gesamtleistung aus der ermittelten Spurtreue und der benötigten Fahrzeit dargestellt.

Bestimmung Spurtreue

Bei der Bestimmung der Spurtreue wird zu jedem Messpunkt der Abstand zwischen der Fahrzeugposition und der Straßen- (Handlingkurs) beziehungsweise Fahrspurmitte (Stadtkurs) bestimmt. Die Fahrzeugposition ist durch einen Punkt in der Mitte der Vorderachse gegeben. Die Mittelspur besteht jeweils aus einzelnen Punkten im Abstand von einem Meter. Zur Bestimmung der Spurtreue wird also stets der Abstand der Verbindungslinie zweier solcher Streckenpunkte zur Fahrzeugposition errechnet.

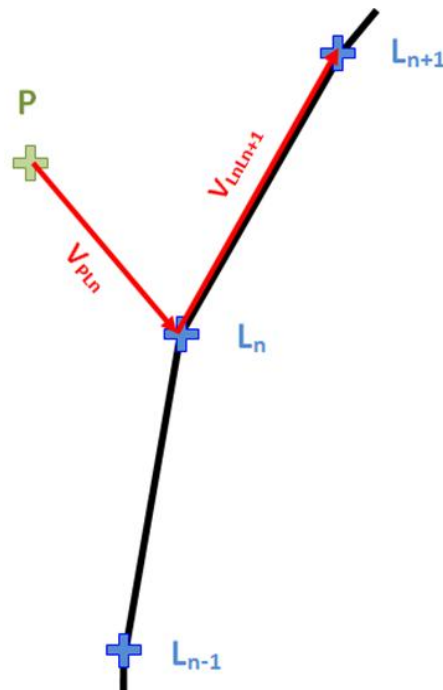


Bild 16: Bestimmung des Abstandes zwischen Fahrzeugposition und Fahrspur

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Bild 16 soll den Vorgang veranschaulichen. Zunächst wird der Punkt der Straßenmitte (hier Punkt L_n) mit dem geringsten Abstand zur Fahrzeugposition (Punkt P) bestimmt. Zur Ermittlung des richtigen Straßenabschnittes werden die Abstände der Punkte L_{n+1} und L_{n-1} zum Punkt P verglichen. In unserem Fall ist die Entfernung von P zu L_{n+1} geringer. Folglich befindet sich das Fahrzeug in diesem Abschnitt. Der Abstand q des Fahrzeuges zur Verbindungslinie der beiden Punkte kann mit der Formel

$$q = \frac{|V_{LnLn+1} \times V_{PLn}|}{|V_{LnLn+1}|} \quad (6.1)$$

berechnet werden. Da die Vorgabe für die Probanden ist, das Fahrzeug innerhalb der Straße beziehungsweise Fahrspur zu lenken, werden nur diejenigen Abweichungen q betrachtet, bei denen sich mindestens ein Reifen außerhalb der Bahn befindet. Aus diesen einzelnen Werten werden anschließend die gemittelte Abweichung und der prozentuale auf der Straße gefahrene Anteil errechnet.

Bestimmung der Anzahl lokaler Extrema des Lenkradwinkels

Als Maß für die Häufigkeit der Lenkrichtungsänderungen dient die Anzahl der lokalen Maxima und Minima des aufgezeichneten Signals des Lenkradwinkels. Zur Bestimmung wurde die Funktion PeakFinder, deren Eingangsvariablen die zu betrachtenden Punkte spezifizieren, verwendet. Dabei lässt sich ein Parameter einstellen, der den Mindestabstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Extrema in Radiant festlegt. Für die Auswertung wurde dieser zu 0,35 Radiant, also circa 20 Grad, gewählt. Auf diese Weise werden kleine Lenkwinkelkorrekturen nicht betrachtet, da diese nicht kritisch zu bewerten sind. Lediglich größere, teils übersteuernde Lenkbewegungen die häufig die Richtung wechseln, sollen in dieser Untersuchung Rückschlüsse auf die Belastung des Fahrers zulassen.

Bestimmung der Gesamtleistung

Die Gesamtleistung eines Probanden auf der jeweiligen Strecke wird mit Hilfe der prozentualen Spurtreue und der für den Kurs benötigten Zeit bestimmt. Um beide Messwerte vergleichbar zu machen, wird jeweils ein Quotient gebildet. Dieser besteht aus der Differenz des über die Anzeigeformen insgesamt schlechtesten Wertes und dem jeweiligen Wert des Probanden und der Differenz aus schlechtestem und bestem Wert. Da für die Probanden die Vorgabe lautete, die Einhaltung der Spur vor der benötigten Zeit während der Fahrzeugführung zu priorisieren, werden den prozentuale Spurtreue und die Zeit mit zwei Drittel und einem Drittel gewichtet. Daraus ergibt sich die folgende Formel

$$GL = \frac{2}{3} * \left(\frac{Spurtreue_{min} - Spurtreue_{Proband}}{Spurtreue_{min} - Spurtreue_{max}} \right) + \frac{1}{3} * \left(\frac{Zeit_{max} - Zeit_{Proband}}{Zeit_{max} - Zeit_{min}} \right) \quad (6.2)$$

zur Bestimmung der Gesamtleistung.

6.2 Allgemeine Ergebnisdarstellung

Um einen ersten Eindruck über die Ergebnisse der einzelnen Stichproben und deren Verteilungen zu gewinnen, werden diese in sogenannten Boxplots dargestellt (Bild 17).

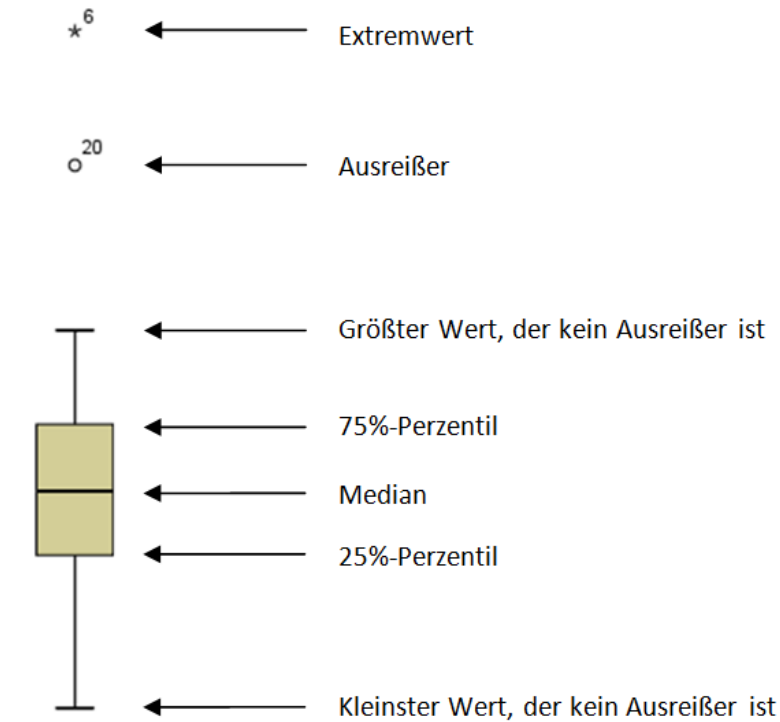


Bild 17: Beschreibung Boxplot

Der Median teilt die Gesamtheit der Werte in zwei Hälften, das 25%- und das 75%-Perzentil teilen jeweils die Werte entsprechend ihrer Prozentzahl in zwei Bereiche, die Querstriche geben die kleinsten und größten Werte an, die noch keine Ausreißer sind. Durch die Kreise sind Ausreißer, durch die Sterne Extremwerte gekennzeichnet. Für die Standardabweichung wird die Variable σ verwendet. Es wird der Übersichtlichkeit halber in diesem Abschnitt nur eine Auswahl an Messergebnissen dargestellt. Zusammengefasst befinden sich alle im Anhang.

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Lerneffekt bei Gesamtleistung und Bewertung Beherrschbarkeit

Der Lerneffekt mit Predictive Display wird auf dem Handlingkurs anhand der erzielten Gesamtleistung und der bewerteten Beherrschbarkeit untersucht. Die Mittelwerte der Gesamtleistung der Probanden A ($\mu=0,846$; $\sigma=0,077$), die zuerst den Stadtkurs fahren, und der Probanden B ($\mu=0,851$; $\sigma=0,098$), die zunächst den Handlingkurs absolvierten, zeigen keinen Unterschied. Lediglich ist bei der Standardabweichung eine etwas geringere Streuung auf Seiten der Probanden A feststellbar.

Bei der Bewertung der Beherrschbarkeit stuften die Probanden A ($\mu=7,73$; $\sigma=1,272$) die Beherrschbarkeit auf dem Handlingkurs geringfügig höher ein als die Probanden B ($\mu=7,18$; $\sigma=1,662$). Auch hier fällt die Abweichung der Probanden A zum Mittelwert kleiner aus.

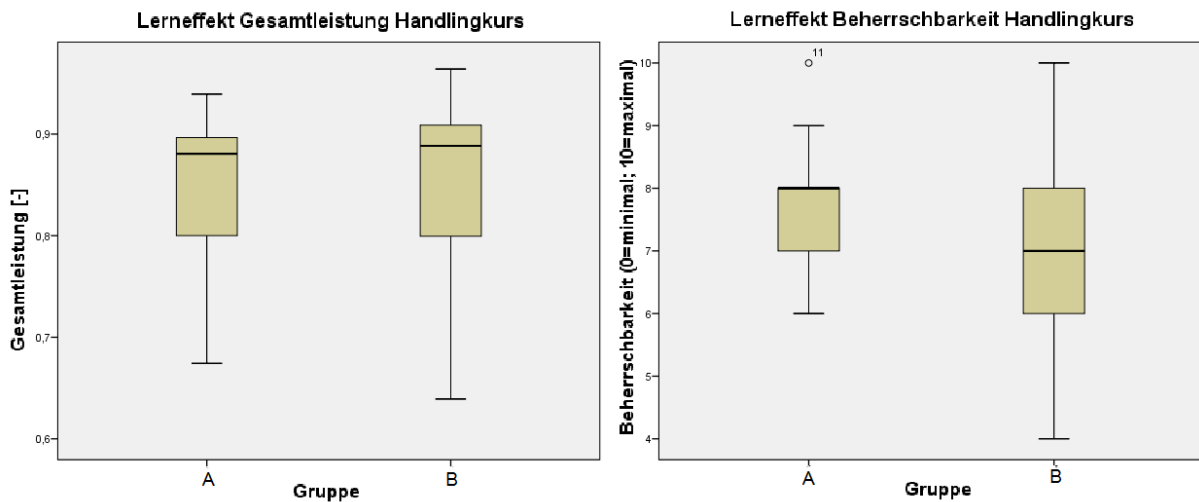


Bild 18: Lerneffekt bei Gesamtleistung und Bewertung der Beherrschbarkeit

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Subjektive Bewertung Beherrschbarkeit und Belastung

Bei der Beherrschbarkeit ist zunächst die geringe Einstufung der normalen Anzeige auf Stadt- und Handlingkurs auffällig ($\mu_{\text{Stadt}}=2,05$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,327$; $\mu_{\text{Handling}}=2,86$; $\sigma_{\text{Handling}}=1,037$). Zwar weisen Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=7,09$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,540$; $\mu_{\text{Handling}}=7,45$; $\sigma_{\text{Handling}}=1,471$) und Perfekte Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=7,59$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,182$; $\mu_{\text{Handling}}=8,09$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,868$) ähnliche Mittelwerte auf, die Streuung bei erstgenannten ist jedoch wesentlich höher. Auch bei der Belastung zeigt sich ein ähnliches Bild. Der normalen Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=7,91$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,231$; $\mu_{\text{Handling}}=7,23$; $\sigma_{\text{Handling}}=1,412$) wird eine vergleichsweise hohe Belastung zugeschrieben, die Werte von Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=4,64$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,620$; $\mu_{\text{Handling}}=4,27$; $\sigma_{\text{Handling}}=1,549$) und Perfekter Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=4,18$; $\sigma_{\text{Stadt}}=1,435$; $\mu_{\text{Handling}}=3,23$; $\sigma_{text{Handling}}=1,510$) weisen eine ähnliche Lage auf. Grundsätzlich fällt auf, dass sowohl die Beherrschbarkeit, als auch die Belastung über die drei Anzeigeformen hinweg, im Stadtkurs schlechter eingestuft wird als im Handlingkurs.

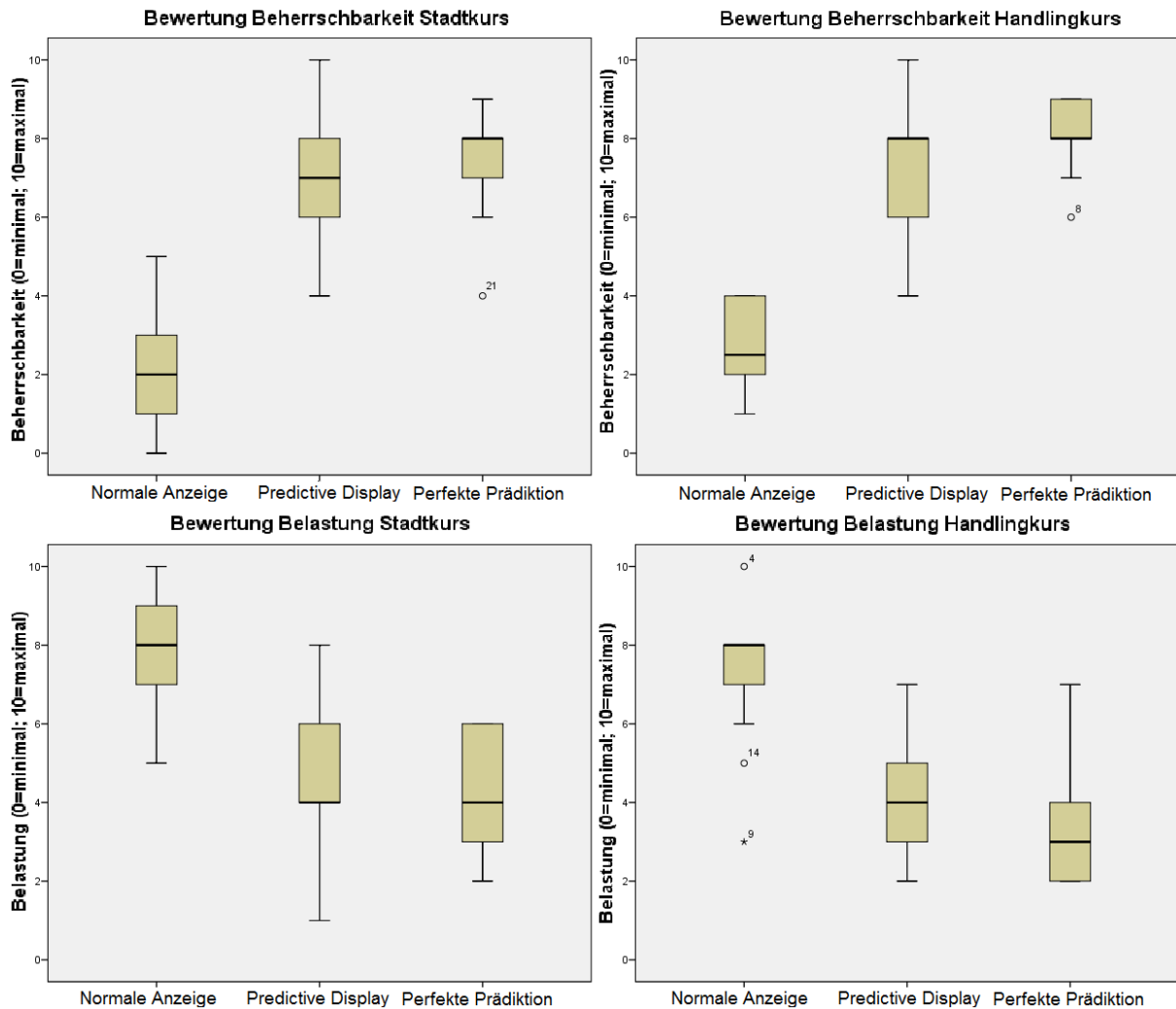


Bild 19: Subjektive Bewertung der Beherrschbarkeit und Belastung

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Lenkrichtungswechsel

Sowohl beim Stadt- als auch beim Handlingkurs zeigt sich eine klare Tendenz. Die Probanden mit Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=44,82$; $\sigma_{\text{Stadt}}=6,82$; $\mu_{\text{Handling}}=29,95$; $\sigma_{\text{Handling}}=7,86$) benötigten durchschnittlich am wenigsten Lenkrichtungswechsel, gefolgt von der Perfekten Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=55,05$; $\sigma_{\text{Stadt}}=11,90$; $\mu_{\text{Handling}}=37,45$; $\sigma_{\text{Handling}}=11,49$) und schließlich von der normalen Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=73,68$; $\sigma_{\text{Stadt}}=17,76$; $\mu_{\text{Handling}}=71,73$; $\sigma_{\text{Handling}}=17,32$). Unter Umständen sind diese Ergebnisse auf die Möglichkeit des vorrausschauenden Fahrens und dem gegebenen Überblick, wo sich das Fahrzeug auf der Straße befindet, mit Predictive Display zurückzuführen. Auch der Blick auf die Standardabweichungen bestätigt dieses Bild. Die Streuung unter Verwendung des Predictive Displays ist im Gegensatz zu den anderen beiden Anzeigeformen jeweils deutlich geringer. Somit war es für die meisten Probanden mit dieser Anzeige möglich das Fahrzeug ohne hastige Lenkbewegungen zu führen.

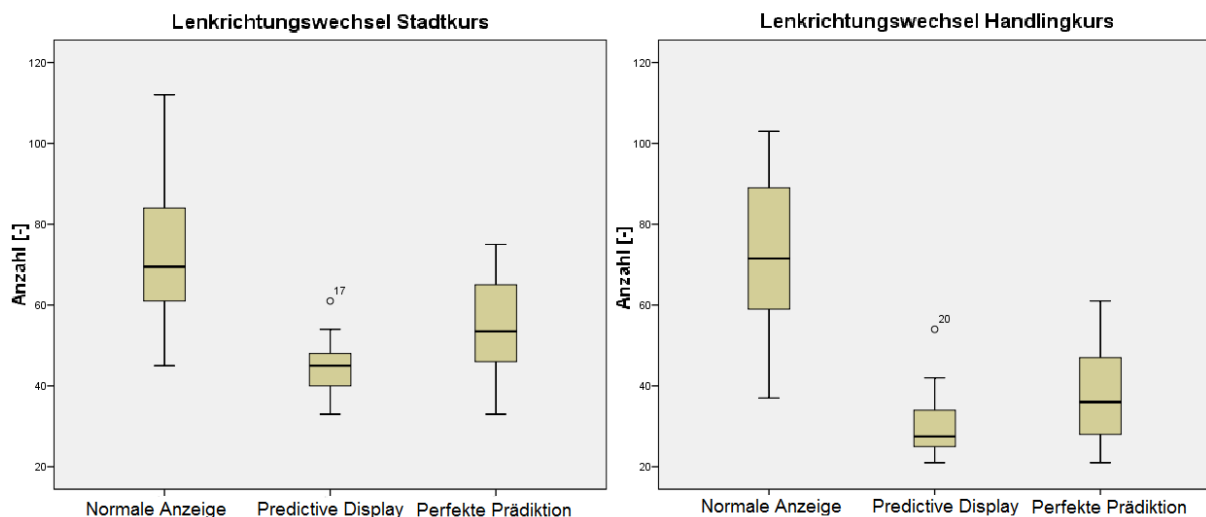


Bild 20: Anzahl der Lenkrichtungswechsel

Gemittelte Abweichung und prozentualer Anteil auf Strecke

Die gemittelte Abweichung der normalen Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=0,90$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,303$; $\mu_{\text{Handling}}=0,71$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,386$) auf dem Stadtkurs zeigt einen erheblichen Nachteil gegenüber dem Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=0,65$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,170$; $\mu_{\text{Handling}}=0,86$; $\sigma_{\text{Handling}}=1,101$) und der Perfekten Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=0,59$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,118$; $\mu_{\text{Handling}}=0,58$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,907$). Man erkennt, dass neben sehr schlechten Teilnehmern (Probanden 6 und 20) einige Teilnehmer trotzdem eine sehr hohe Spurtreue verwirklichen konnten. Die Standardabweichung fällt folglich sehr hoch aus. Auch hier weisen Predictive Display und Perfekte Prädiktion einen ähnlichen Mittelwert auf, lediglich die Abweichung von den jeweiligen Mittelwerten ist bei erstgenanntem geringfügig höher. Beim Handlingkurs zeigt sich ein etwas anderes Bild. Zwar liegen die Mittelwerte von allen drei Darstellungsformen in einem ähnlichen Bereich, jedoch ist die Streuung der Werte von Predictive Display und Perfekter Prädiktion wesentlich höher. Das ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass durch die höhere Geschwindigkeit, mit denen die Probanden

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

diese beiden Anzeigeformen führen, bei Überschreitung der Fahrbahnbegrenzung der Abstand gleich um einiges höher ausfällt.

Betrachtet man den prozentualen Anteil auf den Strecken Stadt- und Handlingkurs wird deutlich, dass sich die Probanden mit normaler Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=0,48$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,117$; $\mu_{\text{Handling}}=0,85$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,098$) öfters außerhalb der Straße befanden als mit Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=0,70$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,091$; $\mu_{\text{Handling}}=0,95$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,055$) oder Perfekter Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=0,60$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,096$; $\mu_{\text{Handling}}=0,95$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,039$). Auf dem Stadtkurs konnten die Probanden mit Display durchschnittlich sogar deutlich den höchsten Prozentsatz erreichen.

Auf dem Stadtkurs ist zwar der durchschnittliche Offset mit Predictive Display höher als mit Perfekter Prädiktion, trotzdem erzielten die Probanden mit letzterer Anzeige einen geringeren Anteil auf der Fahrspur. Durch die mangelnde Übersicht mit der Perfekten Prädiktion konnten die Teilnehmer die Position auf der Fahrspur nicht genau bestimmen. Auf diese Weise überschritten sie die Fahrbahnbegrenzung regelmäßig.

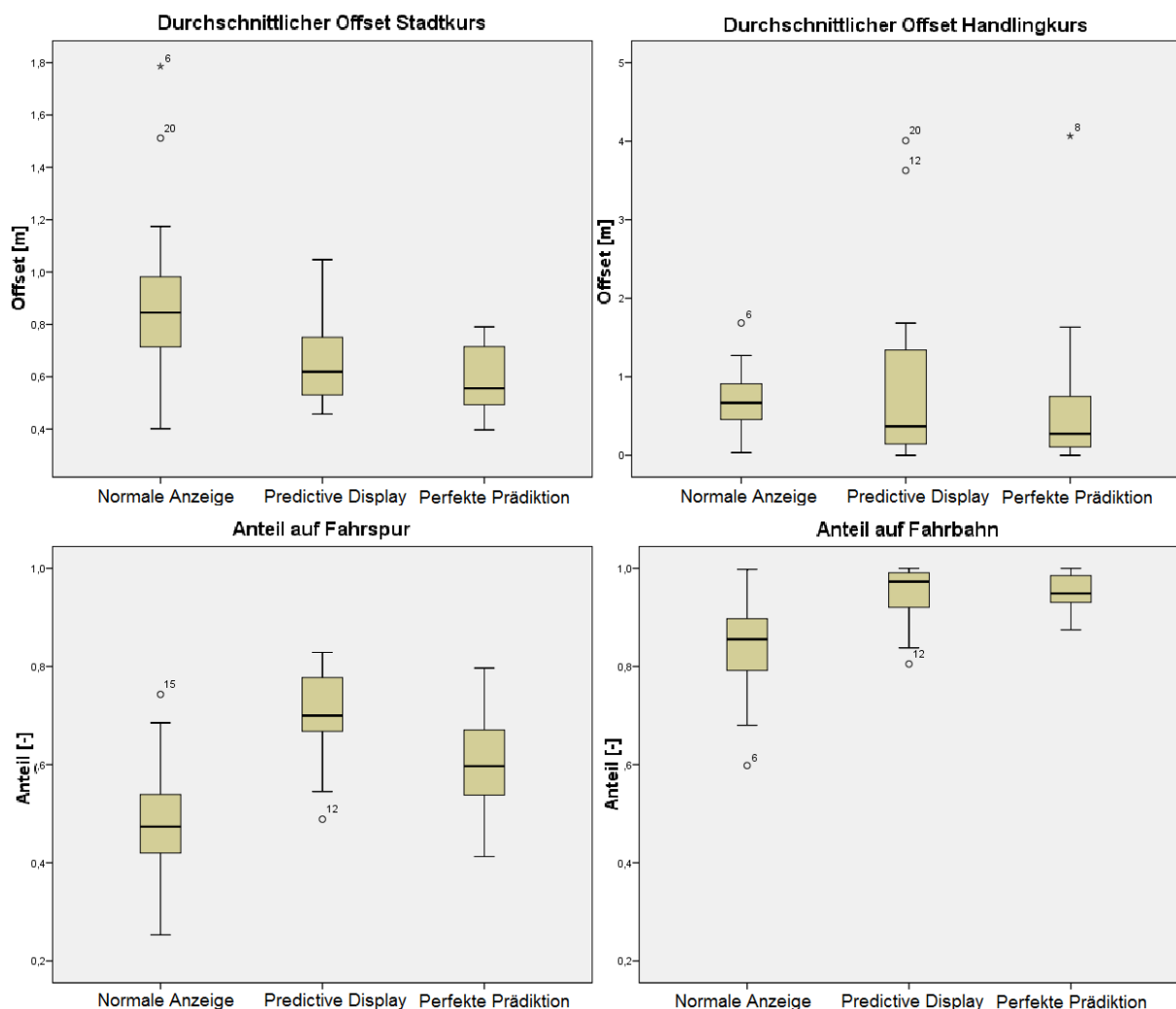


Bild 21: Durchschnittlicher Abstand und Anteil auf Strecke

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Benötigte Zeit

Bei der für die einzelnen Kurse benötigten Zeit deutet sich eine klare Tendenz an. Die Probanden erzielten mit Perfekter Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=103,6$; $\sigma_{\text{Stadt}}=16,90$; $\mu_{\text{Handling}}=115,9$; $\sigma_{\text{Handling}}=10,54$) jeweils die schnellsten Zeiten, danach folgt das Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=111,1$; $\sigma_{\text{Stadt}}=12,13$; $\mu_{\text{Handling}}=128,6$; $\sigma_{\text{Handling}}=19,82$) und schließlich die normale Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=128,7$; $\sigma_{\text{Stadt}}=18,73$; $\mu_{\text{Handling}}=156,1$; $\sigma_{\text{Handling}}=28,48$). Die Verteilungen sind jeweils relativ gleichmäßig, lediglich Proband 19 fuhr generell sehr langsam und vorsichtig. Dieser gab im ersten Fragebogen neben einer geringen Fahrleistung und einem gemäßigten Fahrstil, keine Erfahrungen mit Fahrsimulatoren und wenig mit Computerspielen an.

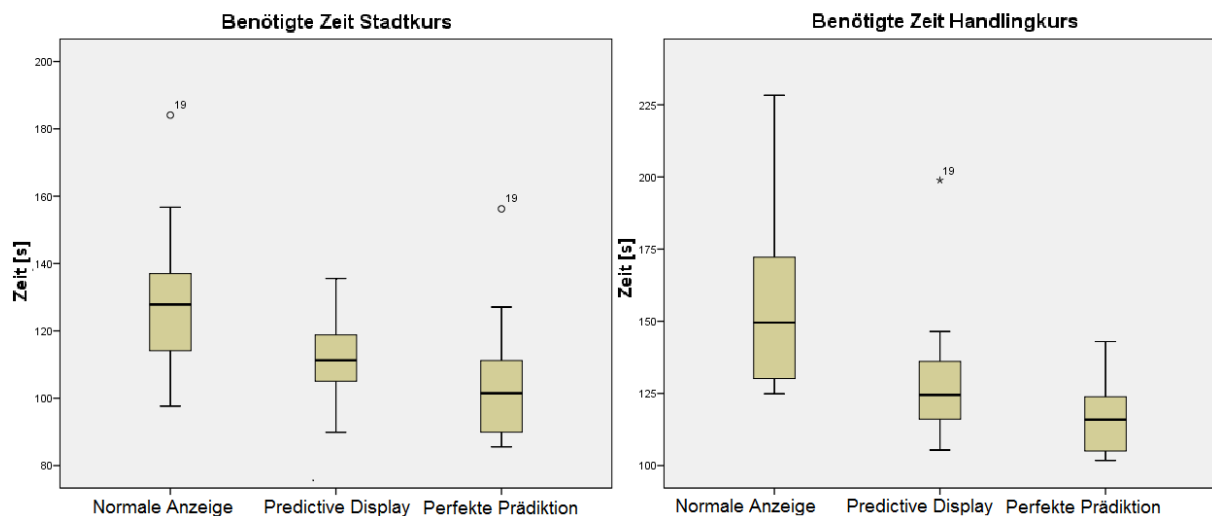


Bild 22: Benötigte Zeit für Stadt- und Handlingkurs

Gesamtleistung

Auf dem Stadtkurs liegt die Gesamtleistung von Predictive Display ($\mu_{\text{Stadt}}=0,762$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,108$; $\mu_{\text{Handling}}=0,849$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,086$) und Perfekter Prädiktion ($\mu_{\text{Stadt}}=0,674$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,113$; $\mu_{\text{Handling}}=0,872$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,071$) deutlich über der normalen Anzeige ($\mu_{\text{Stadt}}=0,452$; $\sigma_{\text{Stadt}}=0,138$; $\mu_{\text{Handling}}=0,608$; $\sigma_{\text{Handling}}=0,165$), wobei ein Vorteil des Predictive Displays zu erkennen ist. Lediglich Proband 19, der auch schon beim Abstand zur Haltelinie und bei der benötigten Zeit durch Ausreißer aufgefallen ist, weicht mit dieser Anzeige stark von den anderen Teilnehmern ab. Beim Handlingkurs weisen Predictive Display und Perfekte Prädiktion sehr ähnliche Werte auf. Die normale Anzeige liegt wiederum weit darunter. Bei dieser ist hier speziell die hohe Streuung der Daten auffällig, was möglicherweise auf die teils sehr hohen Zeiten bei der Absolvierung des Handlingkurses zurückzuführen ist. Um das Aufschwingen des Fahrzeuges während der Fahrt zu vermeiden, wählten einige Teilnehmer eine niedrige Geschwindigkeit.

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

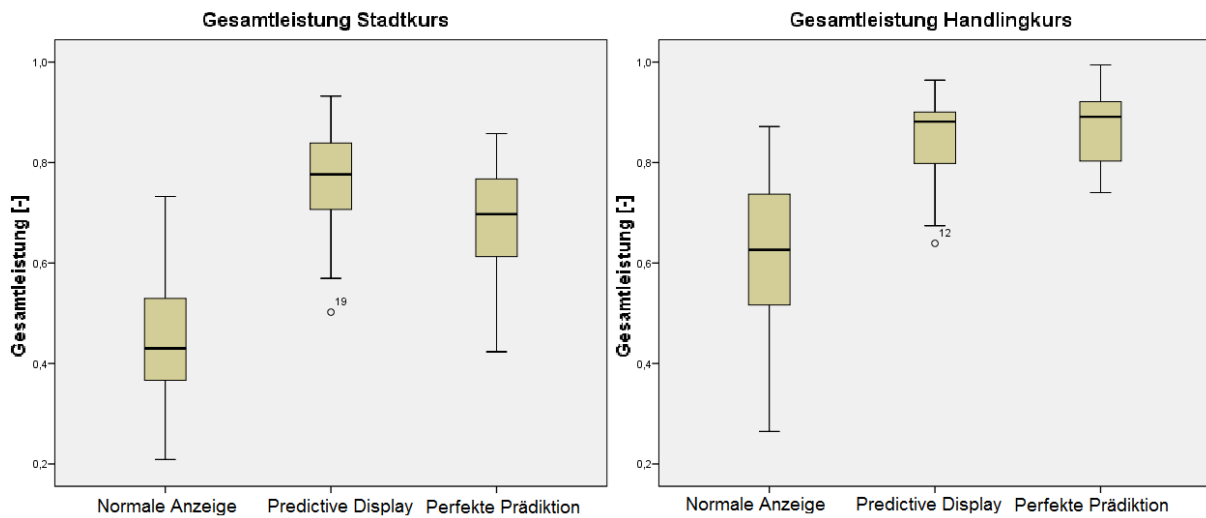


Bild 23: Gesamtleistung auf Stadt- und Handlingkurs

Abstand Haltelinie

Die Probanden erreichten mit dem Predictive Display ($\mu=2,45$; $\sigma=2,44$) den niedrigsten mittleren Abstand, gefolgt von den relativ ähnlichen Mittelwerten der normalen Anzeige ($\mu=3,56$; $\sigma=2,66$) und der Perfekten Prädiktion ($\mu=3,50$; $\sigma=1,63$). Auffällig ist aber, dass bei den ersten beiden Anzeigeformen jeweils ein Teilnehmer offensichtlich große Probleme mit dem zielgerechten Anhalten hatte. Die Probanden mit normaler Anzeige weisen auch ohne diesen Extremwert (Proband 19), der bei der Auswertung nicht mit einfließt, eine hohe Streuung auf. Bei dem Predictive Display ergibt sich die hohe Standardabweichung aus dem Ausreißer (Proband 10). Mit der Perfekten Prädiktion erreichten alle Probanden Werte in einem ähnlichen Bereich und es zeigt sich somit eine relativ niedrige Abweichung.

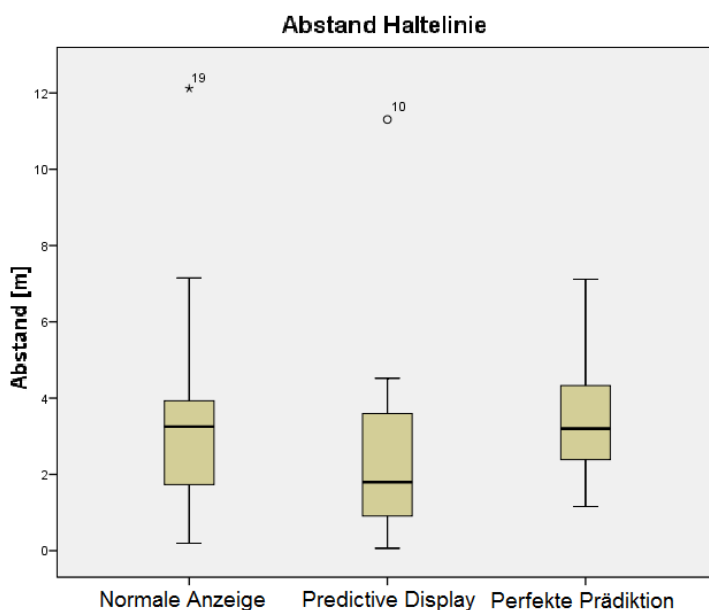


Bild 24: Abstand zur Haltelinie im Stadtkurs

6.3 Überprüfung der Hypothesen

Bei der Untersuchung der Hypothesen kommen verschiedene Tests zur Anwendung, die sich in ihren Voraussetzungen unterscheiden. Aus diesem Grund wird zu Beginn auf die Methodik bei der Auswertung eingegangen und anschließend werden die aufgestellten Hypothesen untersucht.

6.3.1 Auswertungsmethodik

Die statistische Auswertung der Messdaten orientiert sich an dem Vorgehen von [26] und ist in Bild 25 dargestellt. Bei einem Stichprobenumfang von zwei muss zunächst zwischen unabhängigen (zwei Probandenkollektive bewerten ein System) und abhängigen (ein Probandenkollektiv bewertet zwei Systeme) Stichproben unterschieden werden. Unabhängig von diesem Ausgang werden die Stichproben hinsichtlich der Normalverteilung ihrer Grundgesamtheit mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests untersucht. Ist bei abhängigen Stichproben die Voraussetzung der Normalverteilung gegeben, kann der parametrische t-Test für abhängige Stichproben verwendet werden, ansonsten weist der verteilungsfreie Wilcoxon-Test eine bessere Teststärke auf. Sind die zwei unabhängige Stichproben nicht normalverteilt, wird der Mann-Whitney-U-Test herangezogen. Im anderen Fall muss die Stichprobe zunächst mit dem Levene-Test auf Varianzhomogenität überprüft werden. Bei positivem Ausgang kann der t-Test für unabhängige Stichproben verwendet werden, bei negativem der Welch-Test, was bei dieser Auswertung aber nicht vorkam. Bei lediglich einer Stichprobe wird auf den t-Test bei einer Stichprobe zurückgegriffen. Alle Tests werden auf einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ geprüft.

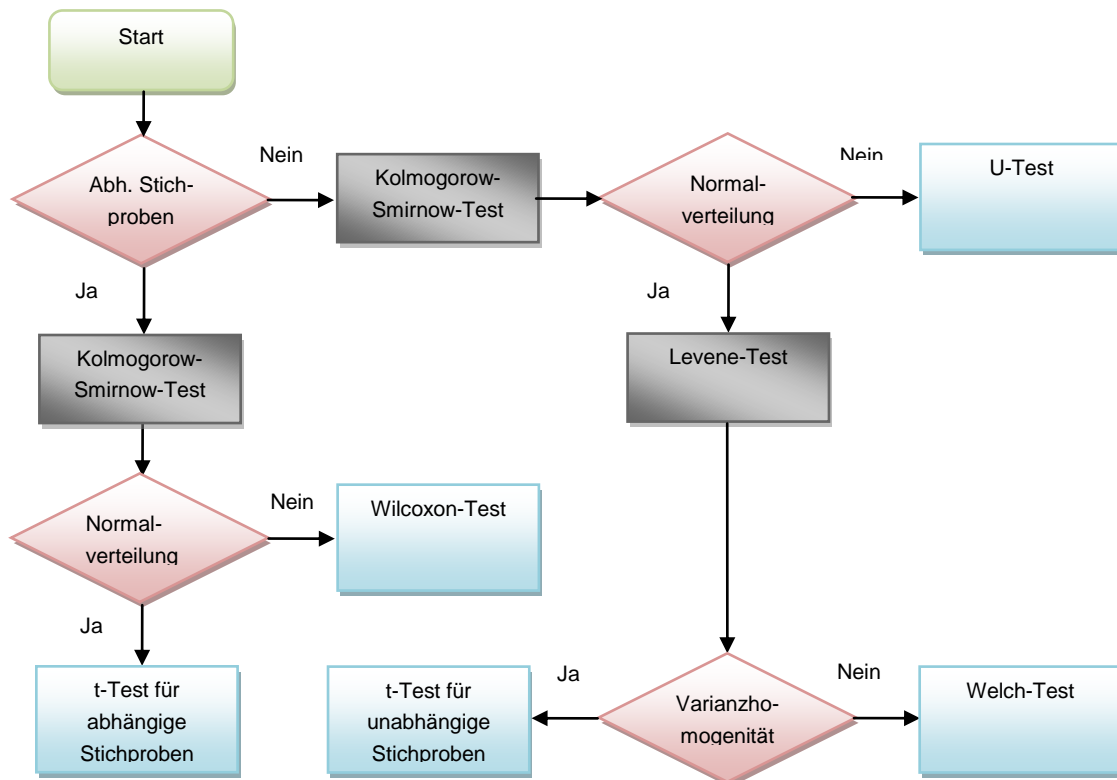


Bild 25: Auswertungsmethodik zur Überprüfung der Hypothesen

6.3.2 Predictive Display

Intuitivität

Die Daten zur Bestimmung der folgenden Hypothesen zeigen keine Normalverteilung. Trotzdem wurde der t-Test für eine Stichprobe verwendet, wobei zu beachten ist, dass dieser dann eine geringere Teststärke aufweist. Zur Untersuchung konnten die Probanden jeweils Werte zwischen eins (= trifft zu) und sechs (=trifft nicht zu) in den entsprechenden Fragen ankreuzen. Die Hypothese IN01 überprüft, ob die Fahrspuren des Predictive Displays den Probanden bei der Fahrzeugführung helfen, wobei dafür der bestmögliche Wert eins ist. Mit einem Mittelwert von 1,45 ($\sigma=0,96$) ergab die statistische Auswertung ein signifikantes Ergebnis ($p=0,015$), für einen Mittelwert in der Grundgesamtheit von unter 2.

IN01 Die Fahrspuren helfen den Probanden bei der Fahrzeugführung nicht.	abgelehnt
--	-----------

IN02 untersucht, ob der Rahmen den Probanden bei der Fahrzeugführung nützlich ist. Mit einem Mittelwert von 2,82 ($\sigma=1,44$) zeigt sich kein signifikantes Ergebnis ($p=0,559$) bei einem Testwert von 3.

IN02 Der Rahmen hilft dem Probanden bei der Fahrzeugführung nicht.	kann nicht abgelehnt werden
---	-----------------------------

Die Hypothese IN03 bezieht sich auf die Möglichkeit der Probanden mit Hilfe des Predictive Displays auf den aktuellen Zustand des Fahrzeugs schließen zu können. Der Mittelwert beträgt 2,77 ($\sigma=1,15$) und es wurde der Testwert 3 gewählt. Der t-Test ergibt kein signifikantes Ergebnis ($p=0,365$).

IN03 Die Probanden können nicht auf den aktuellen Zustand des Fahrzeuges schließen.	kann nicht abgelehnt werden
--	-----------------------------

Ähnlich wie die vorangegangene Hypothese untersucht IN04 die Position des Fahrzeuges. Es zeigt sich ein signifikantes Ergebnis ($p=0,048$) bei einem Mittelwert von 1,82 ($\sigma=,85$) und Testwert von 2,2.

IN04 Die Probanden können nicht auf die aktuelle Position des Fahrzeuges schließen	abgelehnt
---	-----------

Fahrzeugführung auf fertigkeitbasiertes Ebene

Die Probanden wurden in zwei Gruppen unterteilt, je nachdem mit welcher Strecke sie anfangen. Zur Untersuchung eines Lerneffektes auf dem Handlingkurs werden jeweils zwischen den Gruppen die Gesamtleistung, die Bewertung der Beherrschbarkeit und die subjektive Einschätzung, mit etwas mehr Übung auch komplexere, unbekannte Verkehrsszenarien durchfahren zu können, verglichen.

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test und dem Levene-Test konnte eine Normalverteilung und Varianzhomogenität der Stichproben nachgewiesen werden. Der t-Test für unabhängige Stichproben führt zu keinem signifikanten Unterschied ($p=0,885$) zwischen den Probanden A ($\mu=0,846$; $\sigma=0,077$) und B ($\mu=0,852$; $\sigma=0,098$).

FE01 Die mit dem Predictive Display erzielten Gesamtleistungen der Probanden A und B unterscheiden sich auf dem Handlingkurs nicht.	kann nicht abgelehnt werden
--	-----------------------------

Da die Voraussetzung der Normalverteilung bei den Stichproben zur Bewertung der Beherrschbarkeit nicht gegeben ist, wurde bei FE02 der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Er liefert keinen signifikanten Unterschied ($p=0,438$) der Probanden A ($\mu=7,73$; $\sigma=1,272$) und B ($\mu=7,18$; $\sigma=1,662$).

FE02 Die Einstufungen der Beherrschbarkeit des Predictive Displays durch die Probanden A und B unterscheiden sich auf dem Handlingkurs nicht.	kann nicht abgelehnt werden
--	-----------------------------

Die Probanden konnten im Fragebogen nach den Fahrversuchen Werte zwischen eins (=trifft zu) und sechs (=trifft nicht zu) ankreuzen, ob sie sich mit mehr Übung auch vorstellen können komplexere und unbekanntere Szenarien zu durchfahren. Bei einem Mittelwert von 2,23 ($\sigma=1,34$) zeigt der t-Test bei einer Stichprobe ein höchst signifikantes Ergebnis ($p=0,001$) für einen Testwert von 2,5.

FE03 Auch mit mehr Übung trauen sich die Probanden komplexere, unbekanntere Szenarios mit dem Predictive Display nicht zu.	abgelehnt
---	-----------

6.3.3 Vergleich der drei Darstellungsformen

Risikobereitschaft

Die Risikobereitschaft der Probanden wird anhand von subjektiven Bewertungen der Probanden untersucht. So konnten die Probanden bewerten ob sie das Gefühl hatten ein reales Auto zu steuern und wie risikobereit sie jeweils im Vergleich zu den anderen Anzeigeformen waren. Es konnte keine Normalverteilung der Stichproben gezeigt werden, also werden die Hypothesen mit Hilfe des Wilcoxon-Tests untersucht.

Die Untersuchung der Hypothese RB01 liefert einen hoch signifikanten Unterschied ($p=0,006$) zwischen Predictive Display ($\mu=4,05$; $\sigma=1,40$) und normaler Anzeige ($\mu=5,18$; $\sigma=1,01$). Die Probanden hatten mit dem Predictive Display eher das Gefühl ein reales Auto zu steuern.

RB01 Das Gefühl ein reales Auto zu steuern unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige nicht.	abgelehnt
--	-----------

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Ähnlich wie RB01 zieht RB02 den Vergleich nun zur Perfekten Prädiktion ($\mu=2,95$; $\sigma=1,56$). Auch hier liefert der Wilcoxon-Test einen hoch signifikanten Unterschied ($p=0,004$). Die Probanden hatten mit der Perfekten Prädiktion eher das Gefühl ein reales Auto zu steuern.

RB02 Das Gefühl ein reales Auto zu steuern unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion nicht.	abgelehnt
--	-----------

Die Teilnehmer konnten ihre Risikobereitschaft jeweils im Vergleich zu den anderen beiden Anzeigen mit den Werten eins (= höhere Risikobereitschaft trifft zu) bis sechs (höhere Risikobereitschaft trifft nicht zu) darstellen. Betrachtet man das Predictive Display ($\mu=3,18$; $\sigma=1,50$) und die normale Anzeige ($\mu=4,18$; $\sigma=1,65$), ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($p=0,076$).

RB03 Die Risikobereitschaft unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige nicht.	kann nicht abgelehnt werden
---	-----------------------------

Auch bei dem Vergleich mit der Perfekten Prädiktion ($\mu=2,95$; $\sigma=1,53$) liefert der Wilcoxon-Test keinen signifikanten Unterschied ($p=0,611$).

RB04 Die Risikobereitschaft unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion nicht.	kann nicht abgelehnt werden
---	-----------------------------

Geschwindigkeitsgefühl

Das Geschwindigkeitsgefühl soll sich durch den variierenden Abstand zwischen Fahrzeug und Predictive Display verbessern. Die Teilnehmer beurteilten in dem Fragebogen nach dem Fahrversuch jeweils, ob sie die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs gut einschätzen konnten mit Werten zwischen eins (=trifft zu) und sechs (=trifft nicht zu). Da die Stichproben nicht normalverteilt sind, wird der Wilcoxon-Test verwendet.

Es ergibt sich ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=2,45$; $\sigma=1,18$) und normaler Anzeige ($\mu=4,73$; $\sigma=1,24$). Die Hypothese GG01 wird abgelehnt, da die Probanden mit Predictive Display angaben, die Geschwindigkeit besser einschätzen zu können.

GG01 Der Eindruck der Probanden zur Einschätzung der Geschwindigkeit mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur normalen Anzeige nicht.	abgelehnt
--	-----------

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Das Ergebnis zeigt keinen signifikanten Unterschied ($p=0,572$) zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion ($\mu=2,27$; $\sigma=1,12$).

GG02 Der Eindruck der Probanden zur Einschätzung der Geschwindigkeit mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur Perfekten Prädiktion nicht.

kann nicht
abgelehnt werden

Entlastung des Fahrers

Die Belastung der Fahrer wird anhand der subjektiven Einschätzung der Probanden und der Anzahl der Lenkrichtungswechsel jeweils auf dem Stadt- und Handlingkurs untersucht. Die Probanden konnten nach jeder Fahrt die Höhe der aufgetretenen Belastung mit einer Bewertungsskala von null (=niedrigste) bis zehn (=höchste) bestimmen. Bei den Lenkrichtungswechseln kann eine hohe Anzahl einen Hinweis auf eine hohe Belastung geben. Die Stichproben der Hypothesen EF05 und EF06 zeigen eine Normalverteilung, weshalb der t-Test für abhängige Stichproben verwendet wird. Ansonsten wird mit dem Wilcoxon-Test ausgewertet.

Für den Vergleich zwischen Predictive Display ($\mu=4,64$; $\sigma=1,62$) und normaler Anzeige ($\mu=7,91$; $\sigma=1,23$) auf dem Stadtkurs ergibt sich ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$), da die Probanden die Belastung mit Display geringer einstufen.

EF01 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

abgelehnt

Die Perfekte Prädiktion ($\mu=4,18$; $\sigma=1,44$) unterscheidet sich nicht signifikant ($p=0,207$) zum Predictive Display auf dem Stadtkurs.

EF02 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

kann nicht
abgelehnt werden

Auch die Auswertung der Hypothese EF03 auf dem Handlingkurs zeigt wie EF01 einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=4,27$; $\sigma=1,55$) und normaler Anzeige ($\mu=7,23$; $\sigma=1,41$). Die Belastung mit dem entwickelten Display ist geringer.

EF03 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

abgelehnt

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Zwischen der Perfekten Prädiktion ($\mu=3,23$; $\sigma=1,51$) und dem Predictive Display herrscht ein hoch signifikanter Unterschied ($p=0,005$), mit der geringeren Belastung auf der Seite des prädizierten Videobildes.

EF04 Die subjektive Einschätzung der Belastung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

Bei der Untersuchung der Anzahl der Lenkrichtungswechsel von Predictive Display ($\mu=44,82$; $\sigma=6,82$) und normaler Anzeige ($\mu=73,68$; $\sigma=17,76$) auf dem Stadtkurs, ist das Ergebnis ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$). Die Probanden mit letztgenannter Anzeige führten mehr Lenkrichtungswechsel durch.

EF05 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur normalen Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

Ebenfalls ergibt sich beim Vergleich mit der Perfekten Prädiktion ($\mu=55,05$; $\sigma=11,90$) ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$), da die Probanden mit Predictive Display weniger Lenkrichtungswechsel benötigten.

EF06 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur Perfekten Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

Betrachtet man die Lenkrichtungswechsel auf dem Handlingkurs, zeigt sich ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=29,95$; $\sigma=7,86$) und normaler Anzeige ($\mu=71,73$; $\sigma=17,23$). Die Fahrzeugführung mit normaler Anzeige erforderte eine höhere Anzahl.

EF07 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur normalen Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.	abgelehnt
---	-----------

Auch mit Perfekter Prädiktion ($\mu=37,45$; $\sigma=11,49$) benötigten die Probanden mehr Lenkrichtungswechsel zur Fahrzeugführung. Der Wilcoxon-Test liefert einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,001$) zum Predictive Display.

EF08 Die Anzahl der Lenkrichtungswechsel mit dem Predictive Display unterscheidet sich zur Perfekten Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.	abgelehnt
---	-----------

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Erfüllung Fahraufgabe

Zur Untersuchung der Hypothesen FA01 bis FA08 werden die Gesamtleistungen und die subjektive Beherrschbarkeit auf den beiden Kursen betrachtet. Die Höhe der Beherrschbarkeit wird durch eine Bewertungsskala von null (=niedrigste) bis zehn(=höchste) beurteilt. Die Hypothesen FA09 und FA10 sollen mit Hilfe des Abstandes zu einer Haltelinie einen Rückschluss auf die longitudinale Steuerung liefern.

Da die Daten der Hypothese FA01 normalverteilt sind, wird zur Auswertung der t-Test für abhängige Stichproben verwendet. Dieser zeigt einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=0,762$; $\sigma=0,108$) und normaler Anzeige ($\mu=0,452$; $\sigma=0,138$). Die Probanden erzielten mit dem entwickelten Display eine höhere Gesamtleistung.

FA01 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

Genauso liefert der t-Test für den Vergleich zur Perfekten Prädiktion ($\mu=0,674$; $\sigma=0,113$) einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,000$), mit einem höheren Mittelwert des Predictive Displays.

FA02 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

Betrachtet man den Handlingkurs ergibt sich wie bei FA01 ebenfalls mit dem Wilcoxon-Test ein höchst signifikanter Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=0,849$; $\sigma=0,086$) und normaler Anzeige ($\mu=0,608$; $\sigma=0,165$). Die Gesamtleistung mit normaler Anzeige liegt sehr viel niedriger.

FA03 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.	abgelehnt
---	-----------

Der Unterschied zur Perfekten Prädiktion ($\mu=0,872$; $\sigma=0,071$) fällt mit dem Wilcoxon-Test nicht signifikant ($p=0,211$) aus.

FA04 Die Gesamtleistung unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.	kann nicht abgelehnt werden
---	--------------------------------

Die Probanden bewerten die Beherrschbarkeit mit Predictive Display ($\mu=7,09$; $\sigma=1,540$) höher als mit normaler Anzeige ($\mu=2,05$; $\sigma=1,327$) auf dem Stadtkurs. Der Wilcoxon-Test ergibt einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,000$) der Mittelwerte.

FA05 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Stadtkurs nicht.	abgelehnt
--	-----------

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

Für die Perfekte Prädiktion ($\mu=7,59$; $\sigma=1,182$) zeigt sich kein signifikanter Unterschied ($p=0,076$).

FA06 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Stadtkurs nicht.

kann nicht
abgelehnt werden

Auch für die Beherrschbarkeit auf dem Handlingkurs wird der Wilcoxon-Test verwendet. Er liefert einen höchst signifikanten Unterschied ($p=0,000$) zwischen Predictive Display ($\mu=7,45$; $\sigma=1,471$) und normaler Anzeige ($\mu=2,86$; $\sigma=1,037$), da die Probanden die Beherrschbarkeit mit Display höher einstufen.

FA07 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und normaler Anzeige gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

abgelehnt

Im Vergleich zur Perfekten Prädiktion ($\mu=8,09$; $\sigma=0,868$) ergibt sich ein signifikanter Unterschied ($p=0,044$). Die Probanden stufen mit dieser Anzeige die Beherrschbarkeit besser ein als mit dem Predictive Display.

FA08 Der subjektive Eindruck der Beherrschbarkeit unterscheidet sich zwischen Predictive Display und Perfekter Prädiktion gemessen auf dem Handlingkurs nicht.

abgelehnt

Betrachtet man den Abstand von dem stehenden Fahrzeug zur Haltelinie, zeigt der Wilcoxon-Test einen signifikanten Unterschied ($p=0,042$) zwischen Predictive Display ($\mu=2,45$; $\sigma=2,44$) und normaler Anzeige ($\mu=3,56$; $\sigma=2,66$). Die Teilnehmer blieben mit der normalen Anzeige durchschnittlicher weiter von der Haltelinie entfernt.

FA09 Der Abstand zur Haltelinie mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur normalen Anzeige nicht.

abgelehnt

Die Stichproben weisen eine Normalverteilung auf, weshalb hier der t-Test verwendet wird. Dieser liefert keinen signifikanten Unterschied ($p=0,101$) zur Perfekten Prädiktion ($\mu=3,50$; $\sigma=1,63$).

FA10 Der Abstand zur Haltelinie mit Predictive Display unterscheidet sich im Vergleich zur Perfekten Prädiktion nicht.

kann nicht
abgelehnt werden

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Intuitivität haben einen an manchen Stellen notwendigen weiteren Entwicklungsbedarf bei der Gestaltung des Predictive Displays gezeigt. Zwar bewerteten die Probanden die Fahrspuren als sehr hilfreich und auch in der offenen Frage konnten sie die Aussage der Fahrspuren intuitiv bestimmen, aber speziell bei dem das Fahrzeug repräsentierenden Rahmen gab es immer wieder Anmerkungen zur Verbesserung. Die Verbesserungsvorschläge reichen von der Verlängerung des Rahmens bis hin zur Darstellung eines transparenten Autos. Die Anzeige eines transparenten Autos wurde bei der Entwicklung von prototypischen Predictive Displays auch realisiert und von ersten Test-Probanden als sehr unübersichtlich im Vergleich zum Rahmen bewertet. Die meisten Teilnehmer der Studie stuften den Rahmen für die Fahrzeugführung trotzdem als weniger hilfreich ein. Grundsätzlich gaben die Probanden aber an, einen guten Überblick über das Fahrzeug zu haben und auf dessen aktuelle Position schließen zu können. Bei der Untersuchung der Fahrzeugführung auf fertigkeitbasierter Ebene konnte sowohl hinsichtlich der Gesamtleistung als auch der Bewertung der Beherrschbarkeit kein Lerneffekt nachgewiesen werden. Das ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der Teilnehmer erfahren im Bereich Computerspiele waren und somit die Fahrzeugführung aus der Perspektive des Predictive Displays bereits kennen. Da eine starke Verbesserung der Probanden hinsichtlich der Fahrzeugführung zwischen dem Einfahren und den eigentlichen Versuchsfahrten zu sehen war und die meisten angaben, sich mit etwas mehr Übung auch komplexere, unbekannte Verkehrsszenarien zuzutrauen, ist eine Steuerung auf fertigkeitbasierter Ebene trotzdem denkbar. Hierzu sind jedoch weitere, auch langfristige Untersuchungen nötig.

Die Teilnehmer hatten bei Fahrten mit Predictive Display eher das Gefühl ein reales Auto zu steuern als mit der normalen Anzeige. Betrachtet man Kapitel 3.3.2 erscheint das zunächst verwunderlich. Es wurde herausgearbeitet, durch die ungewohnte Perspektive des Predictive Displays auf das Auto könne man den Eindruck gewinnen nicht tatsächlich ein Fahrzeug zu führen. Viele Probanden gaben jedoch an, das Fahren mit der normalen Anzeige und die damit verbundene verzögerte Reaktion des Videobildes auf ihre Eingaben vermittelte ihnen das Gefühl kein reales Auto zu steuern. Im Vergleich zur Perfekten Prädiktion ergab sich die realistischere Fahrzeugführung mit dieser Anzeige. Diese Bewertung ist auf die gewohnte Perspektive und die nicht merkliche Zeitverzögerung zurückzuführen. Bei der Risikobereitschaft konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Predictive Display und jeweils den beiden anderen Anzeigen herausgearbeitet werden. Der in Kapitel 3.3.1 angesprochene Vorteil bei der Einschätzung der Geschwindigkeit konnte im Vergleich zur normalen Anzeige nachgewiesen werden. Die Probanden hatten ein besseres Geschwindigkeitsgefühl. Betrachtet man jedoch die Perfekte Prädiktion, zeigt sich dieser Vorteil nicht. Die gewohnte Perspektive mit dieser Anzeige, aus der die Probanden üblicherweise bei der Autofahrt die Geschwindigkeit schätzen, ist als Ursache für dieses Ergebnis denkbar. Die Fahrzeugführung mit Predictive Display führt zu einer subjektiv eingeschätzten Entlastung der Fahrer im Unterschied zur normalen Anzeige auf beiden Strecken. Die Gründe hierfür wurden in Kapitel 3.3.1 erarbeitet. Mit der Perfekten Prädiktion

6 Ergebnisse des Fahrversuchs

wird die Belastung auf dem Stadtkurs gleich, auf dem Handlingkurs niedriger eingestuft. Da auf diesem Kurs höhere Geschwindigkeiten gefahren wurden und somit der Abstand des Fahrzeugs zum Predictive Displays höher ist, gestaltet sich eine Einschätzung der aktuellen Lage auf der Fahrbahn schwieriger. Auch Kurven lassen sich wegen der verzögerten Perspektive teilweise schwer einschätzen. Die Fahrzeugführung erfordert deshalb eine erhöhte Konzentration und führt möglicherweise zu einer vermehrten Belastung im Vergleich zur Perfekten Prädiktion. Will man jedoch die Perfekte Prädiktion in der Realität umsetzen, ist es auch hier nicht möglich den Einblick in Kurven zu verbessern. Als weiteres Indiz der Belastung wurde die Anzahl der Lenkrichtungswechsel untersucht. Diese ist auf beiden Strecken von allen drei Anzeigen mit Predictive Display jeweils am geringsten. Dieses Ergebnis ist auf die Aussage der Probanden, einen umfassenden Überblick auf das Fahrzeug zu haben und die Lage des Fahrzeugs auf der Straße gut einschätzen zu können, zurückzuführen. Die Hypothesen zur Erfüllung der Fahraufgabe wurden unter anderem anhand der Gesamtleistung überprüft. Dabei hat sich fast ausschließlich ein signifikanter Vorteil auf beiden Kursen mit dem Predictive Display gezeigt. Lediglich auf dem Handlingkurs ist kein Unterschied der Leistung zur Perfekten Prädiktion festzustellen. Ähnlich wie bei der Anzahl der Lenkrichtungswechsel liegt dieses positive Ergebnis in der Perspektive des Predictive Displays mit dem umfassenden Überblick auf das Fahrzeug begründet. Zusätzlich zur Gesamtleistung wurde die subjektive Einschätzung der Beherrschbarkeit untersucht. Diese stufen die Probanden mit Predictive Display auf beiden Kursen höher ein als mit der normalen Anzeige. Auf dem Stadtkurs bewerteten die Probanden mit der Perfekten Prädiktion die Beherrschbarkeit gleich, auf dem Handlingkurs höher ein. Das etwas schlechtere Ergebnis des Predictive Displays kann auch hier an dem steigenden Abstand zwischen Fahrzeug und Anzeige bei höheren Geschwindigkeiten liegen. Um zusätzlich eine Aussage bezüglich der longitudinalen Steuerung treffen zu können, wurde die Distanz zur Haltelinie betrachtet. Diese fällt mit Predictive Display geringer als mit der normalen Anzeige aus und unterscheidet sich zur Perfekten Prädiktion nicht.

Die Studie hat keinen Lerneffekt nachweisen können und weiteren Entwicklungsbedarf bei der Darstellung des Displays offengelegt. Grundsätzlich konnte die Probandenstudie aber die Vorteile des Predictive Displays gegenüber der normalen Anzeige veranschaulichen. Des Weiteren sind kaum Unterschiede zur Perfekten Prädiktion in der Tauglichkeit für das teleoperierte Fahren festzustellen. Teilweise zeigt sich sogar die Überlegenheit des Predictive Displays. Dies spiegelt sich auch in der abschließenden Frage an die Probanden, welche Darstellung sie bevorzugen, wider. Hier stimmten 14 von 22 der Teilnehmer für das entwickelte Display.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde auf Grundlage von Schätzmechanismen zur Tiefenwahrnehmung ein Predictive Display für das teleoperierte Fahren gestaltet (Kapitel 3) und anschließend in einer Probandenstudie evaluiert (Kapitel 6).

Die in der Studie zu überprüfenden Hypothesen ergaben sich größtenteils aus den mit dem Predictive Display verbundenen Chancen und Risiken. Ferner wurde anhand des Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen ein potenzieller Lerneffekt erläutert. Ein Teil der Hypothesen bezog sich auf das Predictive Display selbst, der Rest zog Vergleiche zwischen den drei unterschiedlichen Anzeigen. Dabei kamen zusätzlich eine normale Anzeige und ein perfekt prädiziertes Videobild zum Einsatz. An den an einem statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik stattgefundenen Fahrversuchen nahmen 22 Studenten und Doktoranten der Technischen Universität München teil. Diese mussten zwei verschiedene Strecken jeweils mit den drei unterschiedlichen Anzeigen bei einer Zeitverzögerung von 500 Millisekunden durchfahren. Während der Fahrversuche wurden sowohl subjektive Messgrößen durch Fragebögen und Bewertungsskalen, als auch objektive Messgrößen aus den Simulationsdaten aufgezeichnet. Diese dienten im Anschluss nach deren Aufbereitung durch Matlab-Skripts zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen.

Es konnte die allgemeine Tauglichkeit des Predictive Displays nachgewiesen werden. Er ist der normalen Anzeige in sämtlichen Belangen überlegen. Im Vergleich zum prädizierten Videobild zeigen sich kaum Nachteile, teils sogar Vorteile.

Die Studie in dieser Arbeit gibt eine grundlegende Tendenz an. Bis Predictive Displays tatsächlich in teleoperierten Straßenfahrzeugen verwendet werden, sind noch umfassende Untersuchungen und Studien notwendig.

Mit insgesamt 8-10 Minuten waren die reinen Fahrzeiten mit Predictive Display relativ kurz. Deshalb sind zusätzlich Langzeittests notwendig, bei denen unter anderem auch Ermüdungserscheinungen und Lerneffekte überprüfbar sind. Auf diese Weise können Schlüsse zu speziell ausgebildeten Operatoren, wie sie zukünftig für das teleoperierte Fahren angedacht sind, gezogen werden.

Das entwickelte Predictive Display und die Ergebnisse der offenen Fragen der Probandenstudie geben erste Anhaltspunkte zu dessen Gestaltung. So hat sich beispielsweise die angezeigte Fahrspur als sehr hilfreich erwiesen. Die Ergebnisse und Anmerkungen zeigen trotzdem weiteres Verbesserungspotential. Die gewonnenen Informationen sollten für die zukünftige Entwicklung verschiedener Darstellungsformen von Predictive Displays genutzt werden. Diese können durch anschließende Untersuchungen in Probandenstudien bewertet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In den Fahrversuchen wurden für das Predictive Display die unverzögerten Signale, für das verzögerte Videobild die um 500 Millisekunden verzögerten Signale der Simulation verwendet. Will man aber das Display in der Realität anwenden, müssen zunächst Algorithmen entwickelt werden, die die Position anhand von Fahrzeugdaten, wie aktuelle Geschwindigkeit, Lenkrad- und Gaspedalstellung, vorausberechnen. Diese Algorithmen müssen extrem zuverlässig sein und mittels umfassender Untersuchungen verifiziert werden.

Die Zeitverzögerung wirkt sich auch auf die Anzeige anderer Verkehrsteilnehmer aus. Die im Videobild angezeigten Positionen stellen nicht die tatsächlichen Positionen dar. Um diesen Effekt nicht zusätzlich berücksichtigen zu müssen, wurden in dem Stadtkurs der vorliegenden Studie lediglich statische Fahrzeug verwendet. Zur Verwendung des teleoperierte Fahrens auf öffentlichen Straßen, müssen also auch andere Verkehrsteilnehmer im Videobild prädiziert werden. Auch hierzu sind sehr zuverlässige Algorithmen und mögliche Darstellungsformen im Videobild zu entwickeln.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Allgemeiner Aufbau einer Teleoperation	4
Bild 2: verschiedene Einsatztypen von UAVs, links: MQ-1 Predator [13], rechts: Ranger [12].....	5
Bild 3: weitere Anwendungen der Teleoperation, links: ROV Nereus, rechts Rover Opportunity auf dem Mars, aus [14] und [16].....	6
Bild 4: Ursachen der Zeitverzögerung	7
Bild 5: Aufzeichnung Übertragungsverzögerung 3G Netzwerk, aus [18].....	8
Bild 6: Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen, angelehnt an [21]	9
Bild 7: Monokulare Schätzmechanismen, links: lineare Perspektive, rechts: gewohnte Größe, aus [23].....	10
Bild 8: Fahrzeugfestes Koordinatensystem.....	11
Bild 9: Darstellung des Predictive Displays.....	12
Bild 10: Zwei verschiedene Geschwindigkeiten bei Zeitverzögerung von 500 ms.....	13
Bild 11: Aufzeichnung Lenkradwinkel mit und ohne Zeitverzögerung	16
Bild 12: Übersicht Stadtkurs	21
Bild 13: Ausschnitt Stadtkurs mit statischem Fahrzeug.....	22
Bild 14: Aufbau des Fahrsimulators	29
Bild 15: Überblick Probandenkollektiv.....	30
Bild 16: Bestimmung des Abstandes zwischen Fahrzeugposition und Fahrspur.....	32
Bild 17: Beschreibung Boxplot.....	34
Bild 18: Lerneffekt bei Gesamtleistung und Bewertung der Beherrschbarkeit.....	35
Bild 19: Subjektive Bewertung der Beherrschbarkeit und Belastung.....	36
Bild 20: Anzahl der Lenkrichtungswechsel.....	37
Bild 21: Durchschnittlicher Abstand und Anteil auf Strecke.....	38
Bild 22: Benötigte Zeit für Stadt- und Handlingkurs	39
Bild 23: Gesamtleistung auf Stadt- und Handlingkurs.....	40
Bild 24: Abstand zur Haltelinie im Stadtkurs	40
Bild 25: Auswertungsmethodik zur Überprüfung der Hypothesen	41
Bild 26: Fragebogen vor dem Fahrversuch.....	57

8 Verzeichnisse

Bild 27: Fragebogen nach dem Fahrversuch59

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kompensation der Zeitverzögerung durch Predictive Display 15

Tabelle 2: Objektive Messgrößen22

Tabelle 3: Beherrschbarkeit- und Belastungsskala23

8.3 Literaturverzeichnis

- [1] BMW Technologiekommunikation, „BMW Group Fahrerassistenzsysteme. Mehr Komfort, mehr Souveränität, mehr Sicherheit.“ Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, München, 2008.
- [2] E. Donges, „Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen,“ *Automobil-Industrie 2/82*, pp. 183-190, 1982.
- [3] J. Rees, „Zeit Online,“ 24 11 2011. [Online]. Available: <http://www.zeit.de/auto/2011-11/autonomes-fahren/seite-4>. [Zugriff am 10 05 12].
- [4] rom/Reuters, „Spiegel Online,“ 08 05 2012. [Online]. Available: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/google-strassenzulassung-fuer-autonomes-auto-a-831920.html>. [Zugriff am 10 05 2012].
- [5] C. Berger und B. Rumpe, „Autonomes Fahren - Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge,“ Universität Braunschweig, Braunschweig, 2008.
- [6] F. Diermeyer, S. Gnatzig, F. Chucholowski und T. Tang, „Der Mensch als Sensor - Der Weg zum teleoperierten Fahren,“ Technische Universität München, München, 2011.
- [7] V. Nitsch, Haptic Human-Machine Interaction in Teleoperation Systems and its Implications for the Design and Effective Use of Haptic Interfaces, München: Universität der Bundeswehr München, Fakultät fürn Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Arbeitswissenschaften, 2011.
- [8] J. Zhu, X. He und W. Gueaieb, „Trends in the Control Schemes for Bilateral Teleoperation with Time Delay,“ in s *Autonomous and Intelligent Systems*, Second International Conference, Burnaby, 2011.
- [9] R. Schneller, Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Zeitverzögerungen auf die Fahrleistung beim teleoperierten Fahren, München: Technische Universität München, 2011.
- [10] T. Fong und C. Thorpe, „Vehicle Teleoperation Interfaces,“ *Autonomous Robots 11*, pp. 9-18, 2001.

- [11] S. Clarke-Griebisch, *Overcoming the Network Delays in Telepresence Systems with Prediction and Inertia*, München: Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik der Technischen Universität München, 2006.
- [12] UAV Dach Working Group, „Deutschsprachige Arbeitsgruppe für Unbemannte Luftfahrzeuge (UAV),“ 15 4 2006. [Online]. Available: http://www.uavdach.org/Anwendungen/060415_UVSI_News-Flash_Auszug.pdf. [Zugriff am 13 5 2012].
- [13] IAM, „International Association of Machinists and Aerospace Workers,“ 24 03 2009. [Online]. Available: http://www.goiam.org/uploadedImages/mq1_predator.jpg. [Zugriff am 25 09 2012].
- [14] British Broadcasting Company, „BBC News,“ 03 06 2009. [Online]. Available: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8080324.stm>. [Zugriff am 14 05 2012].
- [15] T. B. Sheridan, *Telerobotics, automation, and human supervisory control*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1992, pp. 592-606.
- [16] R. Nemiroff und J. Bonnell, „Astronomy Picture of the Day,“ NASA, 14 12 2005. [Online]. Available: http://apod.nasa.gov/apod/image/0512/enduranceplus_opportunity.jpg. [Zugriff am 13 06 2012].
- [17] F. Chucholowski, „Auswertung Delay bei verschiedenen Messfahrten,“ Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik Technische Universität München, München, 2012.
- [18] S. Gnatzig, F. Chucholowski, T. Tang und M. Lienkamp, „A System Design for Teleoperated Road Vehicles,“ Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, München, 2012.
- [19] M. V. Noyes, *Superposition of graphics on low bit-rate video as an aid to teleoperation*, Massachusetts: Massachusetts Institut of Technology, 1984.
- [20] D. Cobzas und M. Jagersand, „Tracking and Predictive Display for a Remote Operated Robot using Uncalibrated Video,“ *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, pp. 9-10, 09 2005.
- [21] J. Rasmussen, „Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models,“ in *s IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC 13, No.3*, 1983, pp. 257-266.
- [22] H. Winner, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [23] K. Gegenfurtner, „Vorlesung Allgemeine Psychologie, Tiefensehen,“ Justus-Liebig-Universität Giessen, Giessen, 2006.

8 Verzeichnisse

- [24] W. Käppler und F. Pitrella, „Evaluation of Vehicle Handling: Design and Test of the Two-Level Sequential Judgement Rating Scale.“ in s *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Manual Control*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1988.
- [25] N. Yoder, „Matlab Central,“ 06 10 2009. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25500>. [Zugriff am 02 09 2012].
- [26] M. Schreiber, Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manoverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2012.

9 Anhang

9.1 Fragebögen

Fragebogen vor dem Fahrversuch zur Untersuchung des Predictive Displays beim teleopertierten Fahren

Proband Nummer: _____

Alter	_____ Jahre
Geschlecht	<input type="checkbox"/> m <input type="checkbox"/> w
Fahrleistung pro Jahr	<input type="checkbox"/> bis 5.000 km <input type="checkbox"/> 5.000 km bis 10.000 <input type="checkbox"/> 10.000 km bis 20.000 km <input type="checkbox"/> über 20.000 km
Wie beurteilen Sie ihren Fahrstil?	gemäßigt <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sportlich
Haben Sie Erfahrungen mit Fahrsimulatoren?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Wie schätzen Sie ihre Computerspieleerfahrung ein?	erfahren <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> unerfahren

Anmerkungen vor dem Fahrversuch:

Bild 26: Fragebogen vor dem Fahrversuch

Fragebogen nach dem Fahrversuch zur Untersuchung des Predictive Displays beim teleopertierten Fahren

Proband Nummer: _____

Wie schätzen Sie den Einfluss der Zeitverzögerung auf die Fahrzeugführung ein?		
Ohne Hilfe	Prädiktiver Display	Perfekte Prädiktion
kein <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stark	kein <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stark	kein <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stark

Ich konnte die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs gut einschätzen.	
Ohne Hilfe	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Prädiktiver Display	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Perfekte Prädiktion	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu

Ich hatte das Gefühl ein reales Auto zu steuern.	
Ohne Hilfe	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Prädiktiver Display	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Perfekte Prädiktion	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu

Ich hatte im Vergleich zu den anderen Darstellungsformen ein geringeres Risikobewusstsein.	
Ohne Hilfe	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Prädiktiver Display	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Perfekte Prädiktion	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu

Ich traue mir mit etwas mehr Übung auch zu, komplexere und unbekanntere Verkehrsszenarien sicher zu durchfahren.	
Ohne Hilfe	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Prädiktiver Display	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Perfekte Prädiktion	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu

9 Anhang

Angaben zum Prädiktiven Display	
Die beiden Streifen am Boden haben mir bei der Fahrzeugführung geholfen.	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Was zeigen mir die beiden Streifen?	
Der Rahmen hat mir bei der Fahrzeugführung geholfen.	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Was zeigt mir der Rahmen?	
Ich habe den aktuellen Zustand des Fahrzeugs (Neigung, Kurvenradius, Geschwindigkeit, etc.) erkennen können.	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Ich habe die aktuelle Position des Fahrzeugs erkennen können.	trifft zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> trifft nicht zu
Haben Sie Änderungsvorschläge für das Prädiktive Display?	
Welche Art der Darstellung bevorzugen Sie?	
<input type="checkbox"/> Normaler Modus <input type="checkbox"/> Prädiktiver Display <input type="checkbox"/> Perfekte Prädiktion	
Warum?	
Sonstige Anmerkungen?	

Bild 27: Fragebogen nach dem Fahrversuch

9.2 Daten-CD

- Dyna4 und DynaAnimation Project
- Matlab-Skripts zur Auswertung
- Aufzeichnungen der Fahrversuche
- Ergebnisse der offenen Fragen
- Statistische Auswertung und Grafiken
- Quellen