



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Ergonomie

**Kooperative Interaktionskonzepte zum Fahren eines
teilautomatisierten Fahrzeugs**

Dipl.-Ing. Univ. Martin Michael Kienle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Technische Universität Darmstadt
3. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Die Dissertation wurde am 03.07.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.12.2014 angenommen.



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran danke ich Professor Bubb, der mir mit seiner begeisternden Art das Gebiet der Ergonomie näher gebracht hat. Seine Tür stand stets für mich offen und die anregenden Diskussionen mit ihm gaben mir Denkanstöße für neue Ideen. Professor Bubb wie auch Professor Bengler ermöglichten mir im Rahmen meiner wissenschaftlichen Arbeit, eigenverantwortlich zu handeln und eigene Ideen zu verwirklichen. Für diese, mir gewährte Freiheit, die nicht selbstverständlich ist, möchte ich mich bei beiden herzlich bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank Professor Winner für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls danke ich für die gute Zusammenarbeit und den kollegialen Umgang, der immer für ein angenehmes Arbeitsklima sorgte. Besonders hervorheben möchte ich die Zusammenarbeit mit Dr. Daniel Damböck, ohne dessen Einsatz das DFG geförderte Projekt „H-Mode“ nicht zu stemmen gewesen wäre. Seine Unterstützung, auf die ich stets zählen konnte, hat in besonderem Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meinem Kollegen Professor Eichinger danke ich für seine Hilfsbereitschaft, mir mit seinem Rat bei der Versuchsplanung und statistischen Auswertung zur Seite zu stehen. Ferner gilt mein Dank allen Kollegen der Projekte „H-Mode“ und „Conduct-by-Wire“. Besonders hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang die gute Zusammenarbeit und den produktiven Gedankenaustausch mit Professor Flemisch.

Selbstverständlich danke ich auch allen Studenten, die mich im Rahmen des Projekts „H-Mode“ und der vorliegenden Arbeit unterstützten. Besonderer Dank gebührt Samantha Theissen, die für mich eine unerlässliche Hilfe bei der Durchführung der hier vorgestellten Versuchsreihen war.

Der DFG danke ich für die Förderung des interessanten Projekts „H-Mode“, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand.

München, den 13. Februar 2015



Zusammenfassung

Seit Ende des letzten Jahrhunderts stößt die Entwicklung der aktiven Sicherheitssysteme zunehmend in den Bereich der automatisierten Fahrzeugführung vor. So nimmt z. B. der Abstandsregeltempomat dem Fahrer bereits heute die Längsführungsaufgabe vollständig ab. In den letzten Jahren forcierten die Automobilhersteller ihre Forschung an der teilautomatisierten Fahrzeugführung. Prognosen gehen davon aus, dass technische Systeme in den nächsten Jahren, innerhalb klar definierter Grenzen, die gesamte Fahrzeugführung übernehmen werden. Somit steht ein Paradigmenwechsel bevor, der dazu führt, dass die Aufgabe des Fahrers zunehmend in einer Überwachungsaufgabe der Automation besteht. Diese monotone Tätigkeit könnte einen vigilanz-mindernden Effekt verursachen. Um zu verhindern, dass sich der Fahrer seiner Verantwortung völlig entzieht, verfolgt der Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung einen parallelen Eingriff von Fahrer und Automation in die Fahraufgabe. Dadurch bleibt der Fahrer in einem gewissen Umfang in die Fahrzeugführung involviert und tauscht dabei unentwegt Informationen mit der Automation aus.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung alternativer Bedienkonzepte für die kooperative Fahrzeugführung. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Gestaltung des Bedienelements gelegt, das eine umfassende Interaktion zwischen Fahrer und Automation ermöglichen muss. Da im Fall eines Ausfalls oder einer Fehlfunktion der Automation eine manuelle Fahrzeugführung als Rückfallebene gewährleistet sein muss, werden die Konzepte zunächst auf ihre Tauglichkeit ohne die Unterstützung eines technischen Systems untersucht. In einer zweiten Versuchsreihe wird das vielversprechendste Bedienkonzept im Rahmen der kooperativen Fahrzeugführung überprüft. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer im Fall einer unerwarteten Fehlfunktion der Automation. Diese Versuche finden im Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München statt.

Es kann gezeigt werden, dass ein auf Lenkrad basierendes, aktives Stellteil mit translatorischem Freiheitsgrad entlang der Drehachse eine Alternative bei der manuellen Fahrzeugführung darstellt. Jedoch können die Versuchspersonen die Fahr-



zeugführung bei der Fehlfunktion der Automation schlechter übernehmen als beim konventionellen Bedienkonzept. Diese Tatsache muss vor dem Hintergrund gesehen werden, dass die Versuchspersonen langjährige Erfahrung im Umgang mit dem konventionellen Konzept haben. Sie können in der auftretenden, unerwarteten Situation der Fehlfunktion auf hoch trainierte Handlungsmuster zurückgreifen, die bei der Bedienung des alternativen Konzepts nur bedingt anwendbar sind. Diese Handlungsmuster werden in einem langwierigen Lernprozess erworben, der beim alternativen Bedienkonzept versuchsbedingt durch die verhältnismäßig kurze Eingewöhnung nicht stattfinden kann. Bei dem alternativen Bedienkonzept müssen sich die Probanden zunächst darüber bewusst werden, wie der Eingriff in die Fahrzeugführung durchzuführen ist. Somit ist ein direkter Vergleich nur bedingt möglich und ein schlechteres Abschneiden des neuartigen Konzepts nachvollziehbar. Es lässt sich vermuten, dass ein längerer Umgang mit dem alternativen Stellteil zu einer dem konventionellen Konzept vergleichbaren Übernahmequalität bei einer Fehlfunktion der Automation führen würde.

Trotz der deutlich kürzeren Lernphase lässt sich beim Auftreten der Fehlfunktion für eine große Anzahl der untersuchten Kennwerte kein signifikanter Einfluss des Bedienkonzepts nachweisen. Darüber hinaus bevorzugt die Mehrheit der Versuchspersonen das alternative Bedienkonzept bei der kooperativen Fahrzeugführung und belegt somit das große Potential als Alternative zum konventionellen Bedienkonzept.



Abstract

Since the end of the last century, the development of active safety systems is increasingly pushing forward into the field of automated vehicle control. For example, adaptive cruise control already completely takes over the longitudinal task from the driver. In recent years, automobile manufacturers enforced their research on the semi-automated vehicle. It is predicted that in the next few years the systems will take over the entire vehicle control within clearly defined limits. Thus, a paradigm shift is imminent, which defines the driver's task in monitoring the automation. This monotonous activity could cause a drop in vigilance. In order to prevent the driver from withdrawing from his responsibility, the approach of cooperative vehicle control follows a parallel engagement of the driver and the automation in the driving task. Cooperative vehicle control allows the driver to remain involved in the control of the vehicle to a certain extent and to constantly be able to exchange information with the automation.

The aim of this work is to develop and test alternative cooperative vehicle control concepts, especially regarding the design of the control element, which has to allow an extensive interaction between driver and automation. In case of automation failure or malfunction, manual vehicle control has to be ensured as a security. Consequently, the concepts are initially investigated for their suitability without the support of a technical system. In a second series of experiments, the most promising control concept is verified for the cooperative vehicle control. The focus lies on the takeover of the driving task by the driver in an unexpected malfunction of the automation. These experiments were conducted in the driving simulator of the Institute of Ergonomics at the Technische Universität München.

It is shown that a system based on a steering wheel, extended with translatory movement along the axis and configured as an active control element, is an alternative for manual vehicle control. However, in the case of the automation malfunction, the subjects are not able to take back control of vehicle as well as with a conventional control concept. In consideration of this finding, it should also be taken into account that, through life experience, the subjects have years of experience in dealing with the conventional concept; they can rely on highly trained patterns of



activity that are only partially applicable to the operation of the alternative concept. These patterns are acquired in a long process of learning. Due to the relatively short familiarization of the alternative concept in the experiment, this process could not take place. Using the alternative concept, the subjects first have to become aware of how to perform the intervention in vehicle control. Thus, a direct comparison is only partly possible and the worse performance of the alternative concept is understandable. It can be assumed that prolonged use of the alternative control element leads to comparable takeover quality in case of a malfunction of the automated system.

Despite the significantly shorter learning phase, a large number of the investigated parameters show no significant influence of the concept. Moreover, the majority of subjects prefer the alternative concept for cooperative vehicle control and consequently prove the potential as an alternative to the conventional approach.



Formelzeichen

α_{BP}	Bremspedalstellung
α_F	virtuelle Pedalstellung des Fahrers
α_{FP}	Fahrpedalstellung
α_{LR}	virtuelle Pedalstellung des Längsreglers
$\Delta\psi$	Winkelfehler Querführung
$\Delta\psi_{HC}$	Relativwinkel Idealorientierung
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz des Längsreglers
δ	Lenkwinkel
δ_{QR}	Lenkradwinkel des Querreglers
ψ	Orientierungswinkel
ψ_{HC}	Orientierungswinkel Querführung
$\psi_{Tangente}$	Bahntangentenwinkel
b_{FS}	Breite des Fahrstreifens
b_{FZG}	Breite des Fahrzeugs
d_{ahead}	Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs
F_{BP}	Kraft auf Bremspedal
F_{FP}	Kraft auf Fahrpedal
F_P	Kraft auf Paddle
F_{Sx}	Stickkraft in Längsrichtung
F_{Sy}	Stickkraft in Querrichtung
F_{Yx}	Kraft auf Yoke in Achsenrichtung
M_L	Lenkmoment
s	Streckenmeter des betrachteten Intervalls
TTC	Time-to-Collision
t_{FSW}	Dauer des Fahrstreifenwechsels
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{ahead}	Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs
v_{FF}	Berechnete Geschwindigkeit bei Folgefahrt
v_{VG}	Geschwindigkeitsvorgabe des Längsreglers
v_{Ziel}	Zielgeschwindigkeit der Längsregelung
x	Außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegte Streckenmeter



y	Querablage zur Ideallinie
y_{FW}	Querablage der geplanten Fahrstreifenwechseltrajektorie vom Zielfahrstreifen
y_{Ziel}	Querablage vom Zielfahrstreifen



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Fragestellung	4
1.3	Aufbau und Zielsetzung	5
2	Das Mensch-Maschine-System	7
3	Aktive Stellteile	15
4	Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen	21
4.1	Anordnung	21
4.2	Funktion	23
5	Stand der Technik	29
6	Die Ansätze Conduct-by-Wire und H-Mode	33
6.1	Conduct-by-Wire	34
6.2	H-Mode	35
7	Alternative Bedienkonzepte für die Fahrzeugführung	39
8	Versuchseinrichtung und Metriken	45
8.1	Der Fahrsimulator	45
8.2	Kennwerte zur Evaluierung der Bedienkonzepte	47
8.2.1	Objektive Kennwerte	47
8.2.2	Subjektive Kennwerte	50
9	Versuch zur manuellen Fahrzeugführung	53
9.1	Methodik	53
9.1.1	Versuchsaufbau	53
9.1.2	Probandenkollektiv	66
9.1.3	Versuchsablauf	66
9.1.4	Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen	68



9.2	Hypothesen	72
9.3	Ergebnisse	74
9.3.1	Objektive Daten	74
9.3.2	Subjektive Daten	85
9.4	Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion	89
10	Versuch zur kooperativen Fahrzeugführung	93
10.1	Methodik	93
10.1.1	Versuchsaufbau	93
10.1.2	Probandenkollektiv	103
10.1.3	Versuchsablauf	103
10.1.4	Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen . .	104
10.2	Hypothesen	105
10.3	Ergebnisse	107
10.3.1	Objektive Daten	107
10.3.2	Subjektive Daten	112
10.4	Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion	118
11	Zusammenfassung und Diskussion	123
	Literaturverzeichnis	127
A	Anhang	137
A.1	Demographischer Fragebogen	137
A.2	NASA-TLX	139
A.3	PSSUQ	140
A.4	Geschwindigkeitswechsel	146
A.5	Fahrstreifenwechsel	147
A.6	Längs-Querführungsaufgabe	148
A.7	Landstraße	150
B	Anhang	151
B.1	Fragebogen 1	151
B.2	Fragebogen 2	154
B.3	Ausfall	158



1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit dem Jahr 1907 stieg die Zahl zugelassener Kraftfahrzeuge in der Bundesrepublik Deutschland von ca. 27 Tausend auf über 52 Millionen zum Anfang des Jahres 2013. Den Großteil von ca. 83 Prozent nahmen dabei Personenkraftwagen mit über 43 Millionen ein (Statistisches Bundesamt, 2013b). Ein Grund dafür ist der Wunsch nach individueller Mobilität. So stellten das Kraftfahrzeug und das motorisierte Zweirad im Jahr 2011 zusammen den wichtigsten Faktor der Mobilität, mit 81 Prozent der gesamten Beförderungsleistung – weit vor öffentlichen Verkehrsmitteln wie Bus oder Bahn (Statistisches Bundesamt, 2013a). Ein Ende dieses Trends ist noch nicht absehbar. In den letzten zehn Jahren stieg die Zahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge um ca. zehn Prozent an. Im Vergleich zum Vorjahr 2012 ist ein Zuwachs von ca. 1,2 Prozent zu verzeichnen (Statistisches Bundesamt, 2013b).

Durch die steigende Anzahl registrierter Fahrzeuge nimmt auch die Zahl der Verkehrsteilnehmer auf den Straßen zu und verursacht ein steigendes Verkehrsaufkommen. Unweigerlich steigt dadurch ebenfalls die Zahl der Verkehrsunfälle. Im Jahr 2012 wurden in Deutschland über zwei Millionen polizeilich erfasster Unfälle verzeichnet, von denen fast 300 Tausend mit Personenschaden verliefen. Trotz dieser hohen Zahl an Verletzten nimmt die Zahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden stetig ab. Im Vergleich zum Vorjahr wurden 2,2 Prozent weniger Verletzte registriert. Ebenso sinkt auch die Zahl der Todesopfer stetig (vgl. Abbildung 1.1). Starben im Jahr 1970 noch ca. 21 Tausend Personen bei Verkehrsunfällen, sank die Zahl im Jahr 2012 auf 3600. Das entspricht einem Rückgang von ca. 81 Prozent (Statistisches Bundesamt, 2013b).

Diese Entwicklung hat verschiedene Ursachen. Zum Teil ist der Rückgang der Unfälle mit Personenschaden auf die Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und auf die gesetzlichen Vorgaben und Initiativen zurückzuführen. So sorgte die Festlegung der Höchstgeschwindigkeit innerhalb geschlossener Ortschaften auf 50 km/h im

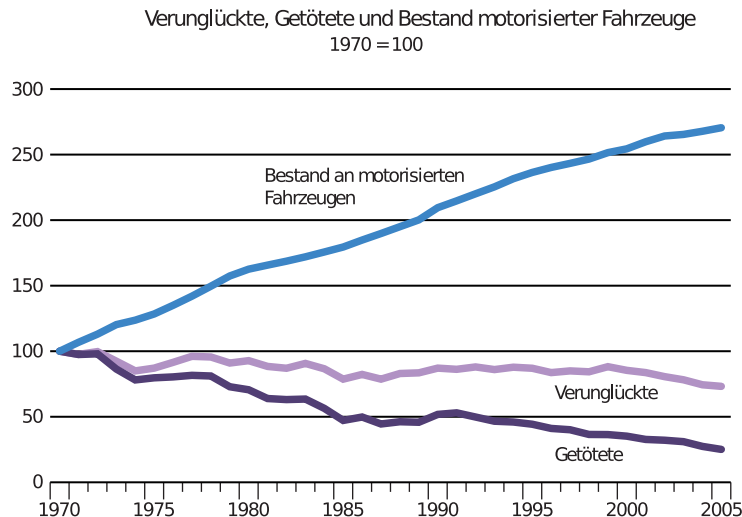


Abbildung 1.1: Entwicklung des Kraftfahrzeugbestands und der Todesopfer im Straßenverkehr (Statistisches Bundesamt, 2006)

Jahr 1957 zu einer direkten Verringerung der Getöteten im Straßenverkehr (Statistisches Bundesamt, 2013c).

Die Europäische Kommission setzte sich am 12.09.2001 das Ziel, die Zahl der Unfalltoten im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2010 zu halbieren. „Auch wenn es in erster Linie in der Zuständigkeit der nationalen und lokalen Behörden liegt, Maßnahmen zu ergreifen, [...] muss die Europäische Union hierzu einen Beitrag leisten“ (Europäische Kommission, 2001, S. 77). Dies sollte durch Harmonisierung der Sanktionen und durch Förderung neuer Technologien für die Straßenverkehrssicherheit geschehen (Europäische Kommission, 2001).

Auch wenn das Ziel von 50 Prozent nicht erreicht wurde, leisteten diese Bestrebungen einen entscheidenden Beitrag zur Verringerung der Unfallopfer. So ist es durchaus verständlich, dass am 28.03.2011 erneut Ziele formuliert wurden. Dieses Mal wurde im Weißbuch das Ziel festgehalten, die Zahl der Unfalltoten im Straßenverkehr bis zum Jahr 2050 „auf nahe Null“ zu reduzieren (Europäische Kommission, 2011, S. 11). Da ein Restrisiko immer bestehen bleibt, erscheint dieses Ziel äußerst ambitioniert. Auf dem Weg zu diesem Fernziel strebt die Kommission an, die Zahl der Unfalltoten bis 2020 zu halbieren (Europäische Kommission, 2011).

Auch dieses Mal soll die „Harmonisierung und Anwendung von Technologie für die Straßenverkehrssicherheit“ (Europäische Kommission, 2011, S. 25) ein entscheidender Faktor zur Erreichung des Ziels sein. So zeigt die Geschichte des Kraftfahrzeugs, dass die Entwicklung technischer Systeme zur Minderung der Unfallfolgen einen großen Einfluss ausüben kann. Die Erfindung des Sicherheitsgurtes im Jahre



1.1 Motivation

1903 bildete die Grundlage für eine drastische Verringerung der Todesfälle. Doch erst in Verbindung mit der 1976 verabschiedeten Anlegepflicht leistet dieses System einen entscheidenden Beitrag.

Der Sicherheitsgurt, wie auch der Airbag und der Seitenaufprallschutz zählen zu den sogenannten passiven Sicherheitssystemen, die die Folgen eines Unfalls verringern sollen. Otte (2000) stellt diese als wesentlichen Faktor zur Unfallfolgenminderung heraus. Allerdings räumt Benz (2004) ein, „dass gerade das Potenzial von passiven Sicherheitssystemen weitgehend ausgereizt ist“ (S. 2). Er schließt daraus, dass das Verringern der Unfallzahlen „überwiegend von aktiven Sicherheitssystemen zu erwarten“ (S. 3) sei. Diese Systeme greifen bereits im Vorfeld in die Fahrzeugführung ein, um einen Unfall zu verhindern oder zumindest zu entschärfen (Winner, Hakuli & Wolf, 2012; Bubb, 2002).

Die Entwicklung dieser aktiven Sicherheitssysteme begann zwar bereits um 1980, nahm aber erst zum Ende des 20. Jahrhunderts an Fahrt auf. Nach anfänglichem Absichern des Fahrzeugs vor dem Eintritt in den dynamischen Grenzbereich stoßen die neueren Systeme in den Bereich der unter normalen Bedingungen unterstützenden Assistenz vor. Die Entwicklung wird nicht mehr allein durch Sicherheitsbestreben getrieben, sondern der Gedanke des Komfortgewinns tritt bei den Automobilherstellern in den Vordergrund. Langfristig sollen die elektronischen Systeme den Fahrer von seiner Aufgabe entbinden und die gesamte Fahrzeugführung übernehmen. Erste Vorreiter stellen z. B. die Teilnehmer der DARPA¹ Grand-Challenge, DARPA Urban-Challenge oder das Forschungsfahrzeug Leonie der Technischen Universität Braunschweig dar (Berger & Rumpe, 2008; Saust, Wille, Lichte & Maurer, 2011). Die mit Abstand größte Bekanntheit erreichte allerdings Google mit seinem fahrerlosen Auto (Thrun, 2010). Diese Fahrzeuge sind bereits heute nicht mehr auf einen Fahrer angewiesen, sondern finden sich selbstständig in ihrer Umgebung zurecht. Auch Automobilhersteller forschen an einer Automation, die in definierten Szenarien die Fahraufgabe übernimmt (Ruchatz, Bartels, Brosig & Efferts, 2011; Rauch, Aeberhard, Ardelt & Kämpchen, 2012).

¹Defense Advanced Research Project Agency



1.2 Fragestellung

Als häufigste Ursache für Verkehrsunfälle kann mit 90 Prozent menschliches Fehlverhalten identifiziert werden (Statistisches Bundesamt, 2013c). Somit erscheint das Vorgehen, den Fahrer durch ein technisches System zu ersetzen, um die Zahl der Unfälle zu verringern, plausibel.

Erfahrungen mit automatisierten Systemen im Umfeld der Luftfahrt zeigen allerdings, dass die Vorteile in Komfort und Sicherheit auch unerwünschte Nebenwirkungen zeigen können. Es können etwa Probleme im Bereich der Bedien- und Verstehbarkeit entstehen (Bainbridge, 1983). Die Verlagerung der direkten Steueraufgabe der Maschine hin zu einer Überwachungsaufgabe der Automation stellt den Bediener vor die Herausforderung, das komplexe System verstehen zu müssen, um dessen Verhalten antizipieren zu können (Wiener, 1989). Darüber hinaus sorgt eine Entlastung von der Steueraufgabe dafür, dass sich der Mensch auch geistig von dieser Aufgabe entfernt. Dieses Phänomen, unter dem Begriff *Out-of-the-loop* bekannt, untersuchen unter anderen Endsley und Kiris (1995). Im Bereich der Fahrzeugführung erforscht Damböck (2013) das Fahrerverhalten bei steigendem Automationsgrad. Er findet heraus, dass die Probanden ihre Aufmerksamkeit mit steigender Assistenz bzw. Automation zunehmend einer Nebenaufgabe widmen.

Auch wenn das Ziel der Entwicklung ein autonom fahrendes Fahrzeug darstellt, wird die Automation in den nächsten Jahren nicht alle Verkehrssituationen beherrschen können. Sie wird weiterhin auf den Fahrer angewiesen sein, der an einer Systemgrenze die Fahrzeugführung übernehmen muss. Dabei benötigt dieser Zeit, um von der Nebenaufgabe zurück in die Fahraufgabe zu finden (Gold, Damböck, Bengler & Lorenz, 2013; Gold, Damböck, Lorenz & Bengler, 2013). Um diese Übernahmezeit gering zu halten, sollte ein ausreichendes Situationsbewusstsein aufrechterhalten werden, indem „der Bediener in angemessener Weise mit der Umwelt und der Automation interagiert und dadurch im Regelkreis gehalten wird“ (Damböck, 2013, S. 48).

Diese Interaktion zwischen Mensch und Automation kann dabei über unterschiedlichste Sinneskanäle stattfinden. Die Grundlage bildet jedoch die haptische Kopplung über das Bedienelement, da der Fahrer die Eingaben der Automation unmittelbar wahrnehmen und gegebenenfalls Korrekturen durchführen kann.

Die vorliegende Arbeit verfolgt vor diesem Hintergrund der steigenden Automation im Kraftfahrzeug das Ziel, ein geeignetes Bedienkonzept zu entwickeln, das eine



umfassende Interaktion mit einer Automation ermöglicht und möglichst die durch die Automatisierung entstehenden negativen Effekte abschwächt. Dabei muss der Fahrer die manuelle Fahrt mit dem zugrundeliegenden Bedienelement beherrschen und eine vergleichbare Qualität in der Fahrzeugführung erreichen können, wie mit dem konventionellen, auf Lenkrad und Pedalerie basierenden Konzept.

1.3 Aufbau und Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung und Überprüfung alternativer Bedienkonzepte für die Fahrzeugführung. Dabei werden unterschiedliche Konzepte im Kontext zunehmender Automatisierung und damit einhergehender Interaktion auf ihre Tauglichkeit überprüft.

Zunächst wird in Kapitel 2 auf die theoretischen Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung sowie auf Modelle der Fahrzeugführung eingegangen, um ein grundlegendes Verständnis für die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug und der Automation zu erlangen. Kapitel 3 behandelt die Klassifizierung von Stellteilen. Da das Ziel die Untersuchung alternativer Bedienkonzepte im Rahmen steigender Automation im Fahrzeug ist, wird besonderes Augenmerk auf die Klasse der aktiven Stellteile und deren Wirkprinzip gelegt. Im Anschluss daran werden in Kapitel 4 unterschiedliche Ansätze zur Systematisierung und Einteilung existierender und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme aufgezeigt. Da sich in den letzten Jahrzehnten unterschiedlichste Begriffe zur Beschreibung von Automationsgraden der Fahrzeugführung etabliert haben, bildet die Darstellung bestehender Definitionen den Kern dieses Kapitels.

Kapitel 5 gibt einen kurzen Überblick über die Historie der Fahrerassistenz und stellt aktuelle Forschungsansätze dar. Darüber hinaus werden die Systeme nach der in Kapitel 4 präsentierten Klassifizierung eingeordnet, bevor in Kapitel 6 zwei aktuelle Forschungsansätze als Wegbereiter zur hochautomatisierten Fahrzeugführung erläutert werden. Kapitel 7 stellt einige in der Vergangenheit entwickelte alternative Bedienkonzepte zur Fahrzeugführung vor. Dabei wird auch kurz auf am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München untersuchte Stellteile eingegangen.

Die in den Untersuchungen verwendeten Metriken werden in Kapitel 8 eingeführt. Dabei werden der verwendete Simulator sowie die zur Bewertung der Konzepte herangezogenen Kennwerte vorgestellt. Im Anschluss geht Kapitel 9 auf die durchgeführte Versuchsreihe zur manuellen Fahrt ein. Da die manuelle Bedienung im



Fall eines Automationsausfalls als Rückfallebene dient, muss die Fahrzeugführung für den Fahrer auch ohne Unterstützung durchführbar sein. Außerdem muss ein alternatives Bedienkonzept eine dem konventionellen Bedienkonzept vergleichbare Qualität der Fahrzeugführung ermöglichen.

Da in technischen Systemen Fehler auftreten können, geht Kapitel 10 schließlich der Frage nach, ob sich die Wahrnehmung einer Fehlfunktion durch die haptische Kopplung des verwendeten Bedienkonzepts beeinflussen lässt. So wird eine Versuchsreihe vorgestellt, die das vielversprechendste alternative Bedienkonzept aus Kapitel 9 einem auf konventionellen Stellteilen beruhenden Konzept gegenüberstellt. Durch eine simulierte Fehlfunktion, die ein Abdriften vom Fahrstreifen verursacht, wird der Fahrer zu einem unerwarteten Eingriff in die Fahrzeugführung gezwungen.

Den Schluss bildet Kapitel 11, in dem eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben und der daraus entstehende Forschungsbedarf abgeleitet wird.



2 Das Mensch-Maschine-System

Um die Vorgänge zwischen Mensch und Maschine, bzw. im Kontext der Fahrzeugführung, zwischen Fahrer und Fahrzeug beschreiben und verstehen zu können, wird in diesem Kapitel ein Überblick über die theoretischen Grundlagen der Fahrzeuginteraktion gegeben. Dabei werden existierende Modelle zur Beschreibung der Fahraufgabe vorgestellt und einem Modell der menschlichen Informationsverarbeitung gegenübergestellt.

Im Zentrum der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion steht dabei der Mensch, der die Maschine beeinflusst. Seine Handlungen sind nicht willkürlich, sondern resultieren aus einem mentalen Arbeitsprozess, der auf unterschiedliche Weise modelliert werden kann. So beschreibt der klassische psychophysiologische Ansatz ein sequenzielles Stufenmodell, das den Informationsverarbeitungsprozess als Informationsfluss bestehend aus einer Folge von drei Phasen darstellt (Bubb, 1992).

Im ersten Schritt nimmt der Mensch aus seiner Umgebung Reize wahr. Bei dieser *Informationsaufnahme* wird sensorische Arbeit geleistet. Die Informationen werden an das Gehirn weitergeleitet, wo die *Informationsverarbeitung* im engeren Sinn stattfindet. Nach der Identifikation der wahrgenommenen Informationen werden zunächst Handlungsalternativen erzeugt, bevor die davon vielversprechendste ausgewählt wird. Diese wird schließlich bei der *Informationsumsetzung* in eine Handlung umgewandelt.

Auch bei der Fahrzeugführung findet dieser Informationsverarbeitungsprozess statt, an dessen Ende die Informationsumsetzung durch das Bedienen der Fahrzeugteile steht. Für eine genauere Beschreibung der Vorgänge zwischen Mensch und Fahrzeug wird dabei auf eine technische Darstellung zurückgegriffen, die auf dem allgemeinen Mensch-Maschine-Regelkreis basiert (s. Abbildung 2.1). Der Fahrer stellt darin ein Element dar, das Informationen aus der Umgebung aufnimmt, diese verarbeitet und schließlich durch die Informationsumsetzung an das Fahrzeug weitergibt. Die entstehende Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug dient dem Zweck, das vorgegebene Ziel der Fahraufgabe zu erreichen.



des Fahrzeugs Einfluss ausüben, z. B. Betätigungen des Fahr- und Bremspedals sowie des Lenkrads.

Sekundäre Fahraufgabe: Zur sekundären Fahraufgabe zählen alle Tätigkeiten, die für ein sicheres Fortbewegen im Verbund mit anderen Teilnehmern notwendig sind. Darüber hinaus zählen auch Handlungen, die sich aus den Umweltbedingungen ergeben, zu dieser Kategorie. Beispiele sind das Betätigen der Fahrtrichtungsanzeiger oder das Einschalten der Wischer. Auch das Schalten der Gänge fällt in den Bereich der sekundären Aufgaben.

Tertiäre Aufgaben: Die tertiären Aufgaben enthalten alle verbleibenden Handlungen, die der Fahrer während der Fahrt durchführt. Sie betreffen die Fahraufgabe nicht, sondern dienen dem Wohlbefinden des Fahrers. So ist das Einstellen der Belüftung oder der Klimaanlage eine Tätigkeit, die dem Bedürfnis nach Komfort entgegenkommt. Auch das Einschalten des Radios oder das Telefonieren sind tertiäre Aufgaben, die dem Wunsch des Fahrers nach Information nachkommen.

Die primäre Fahraufgabe beinhaltet viele Arbeitsschritte, die sowohl motorische, als auch rein geistige Leistung erfordern. So muss z. B. neben der Betätigung der Stellteile auch die Bewegung des Fahrzeugs im Raum geplant werden.

Auch hier lässt sich die Aufgabe in mehrere Teilaufgaben untergliedern. Dabei hat sich eine Aufteilung der primären Fahraufgabe in die drei Ebenen *Navigation*, *Führung* und *Stabilisierung* etabliert (Bernotat, 1970; Donges, 1978; Michon, 1985). Diese sind kaskadenartig angeordnet und bilden eine hierarchische Struktur, bei der die Aufgabenstellung jeder Ebene durch das Ergebnis der jeweils höheren Ebene vorgegeben wird (Bubb, 1985). Abbildung 2.2 zeigt den erweiterten Mensch-Maschine-Regelkreis, basierend auf dem allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis der Fahrzeugführung (Bubb, 1975).

Navigationsebene: Da bei der Benutzung eines Kraftfahrzeugs grundsätzlich der Wunsch des Fahrers besteht, sich von einem Ort zu einem anderen zu bewegen, muss zunächst ein Weg gefunden werden, über den das Ziel erreicht werden kann. Diese Frage stellt den zentralen Kern der Navigationsebene dar. Die Lösung dieser Aufgabe beinhaltet neben dem zeitlichen Ablauf auch eine genauere Routenplanung, d. h. es wird die zu fahrende Strecke gewählt. Diese ist meist nicht eindeutig und wird durch äußere Begebenheiten beeinflusst. So wird das Fahrzeug nicht auf direktem Weg, sondern auf dem vorhandenen Straßennetz bewegt. Auch das Wissen des Fahrers beeinflusst die Ent-

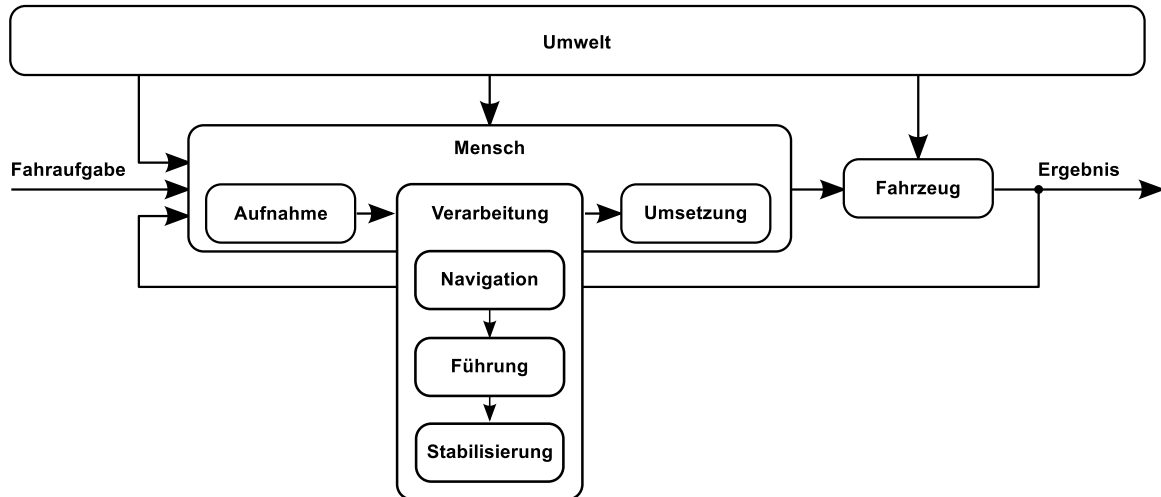


Abbildung 2.2: Erweiterter Mensch-Maschine-Regelkreis basierend auf Bubb (1975)

scheidung. Von Stau geplagte Streckenabschnitte werden so von vornherein umgangen.

Die Navigationsaufgabe wird nur gelegentlich bearbeitet. Häufig wird dieser Entscheidungsfindungsprozess durch äußere Einflüsse angestoßen. So zwingen Straßensperrungen durch Unfall oder Bauarbeiten den Fahrer zu einer neuen Routenplanung. Die zeitliche Anforderung der Navigationsaufgabe ist gering.

Bahnführungsebene: Der zeitliche Ablauf und die Routenplanung werden in dieser Ebene weiterverarbeitet. Aus der zu fahrenden Strecke und eventuell bestehender zeitlicher Vorgaben ergibt sich die durchschnittliche Geschwindigkeit. Selbstverständlich kommen auch hier äußere Einflüsse zum Tragen. Die aktuelle Verkehrssituation und Umweltbedingungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Ebenfalls kann die Durchschnittsgeschwindigkeit durch die anderen Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden. Zählfließender Verkehr oder ein Stau verringern die mögliche Reisegeschwindigkeit. Darüber hinaus wird auf dieser Ebene der Kurs berechnet, der sich durch die umgebende Verkehrssituation legt. Auch hier beeinflussen die Umgebung selbst sowie andere Verkehrsteilnehmer die Trajektorie. Ein langsames, vorausfahrendes Fahrzeug kann den Fahrer veranlassen, den Fahrstreifen zu wechseln.

Diese Planung wird häufig durchgeführt, da sie von der Umgebung beeinflusst ist und sich die unmittelbare Verkehrslage ständig ändert. So steckt Michon (1985) den Zeitrahmen dieser Ebene auf einige Sekunden ab.



Die verrichtete Arbeit auf dieser Ebene ist, wie auch auf der Navigationsebene, rein mental und besteht aus einer Planungsaufgabe. Die Geschwindigkeit sowie die den Kurs beschreibende Trajektorie bilden die Aufgabenstellungen der Stabilisierungsebene.

Stabilisierungsebene: Auf dieser Ebene geschieht die eigentliche Interaktion der Fahrzeugführung, indem die Bewegung durch die Betätigung der Bedienelemente beeinflusst wird. Durch Drücken des Fahr- oder Bremspedals wird die Geschwindigkeit angepasst und das Drehen am Lenkrad regelt den Kurs.

Die Handlungen dieser Ebene müssen besonders erlernt werden. Beispielsweise wird die Bedienung der Pedale und des Lenkrads in der Fahrschule intensiv geübt. Die Aufgabe besitzt eine geringe Komplexität und wird infolge häufiger Wiederholungen und gewonnener Erfahrungen größtenteils unbewusst durchgeführt. Nach Reichart und Haller (1995) geschieht der Eingriff des Fahrers auf die Fahrdynamik mit hoher Wiederholfrequenz. Michon (1985) spricht hier von einer Periodendauer von einigen Millisekunden.

Alle Tätigkeiten, die der Fahrer während der Fahrt durchführt, unterscheiden sich stark in ihrer Ressourcenbindung. Während einige Handlungen die aufmerksame Verfolgung des Fahrers benötigen, führt er andere Tätigkeiten unbewusst durch. Dies beschreibt das SRK¹-Modell der Regulationsebenen nach Rasmussen (1983). Dieses Modell unterteilt das menschliche Verhalten in die drei Ebenen *wissensbasiert*, *regelbasiert* und *fertigkeitsbasiert*, die durch den Grad an bewusster Verarbeitung gekennzeichnet sind (s. Abbildung 2.3).

Fertigkeitsbasiertes Verhalten: Auf dieser Ebene werden unbewusste Handlungen, basierend auf hochgradig integrierten, *automatisierten Handlungsabläufen*, ausgeführt. Diese sensomotorischen Leistungen finden überwiegend als Vorsteuerung statt und werden nur in seltenen Fällen zur rückgekoppelten Regelung (Rasmussen, 1983).

Das Schalten der Gänge stellt ein Beispiel des fertigkeitsbasierten Verhaltens dar. So wird das erlernte Vorgehen vom Fahrer nicht mehr bewusst wahrgenommen, sondern automatisch durchgeführt.

Regelbasiertes Verhalten: Die Handlungen finden auf dieser Ebene als Verkettung von Elementarhandlungen statt. Das Verhalten wird dabei durch *gespeicherte Regeln* festgelegt, die in vergleichbaren Situationen erlernt wurden. Diese Erfahrungen ermöglichen eine Auswahl der Handlungsmuster nach einfachen Entscheidungsbäumen (Rasmussen, 1983).

¹Skill-Rule-Knowledge

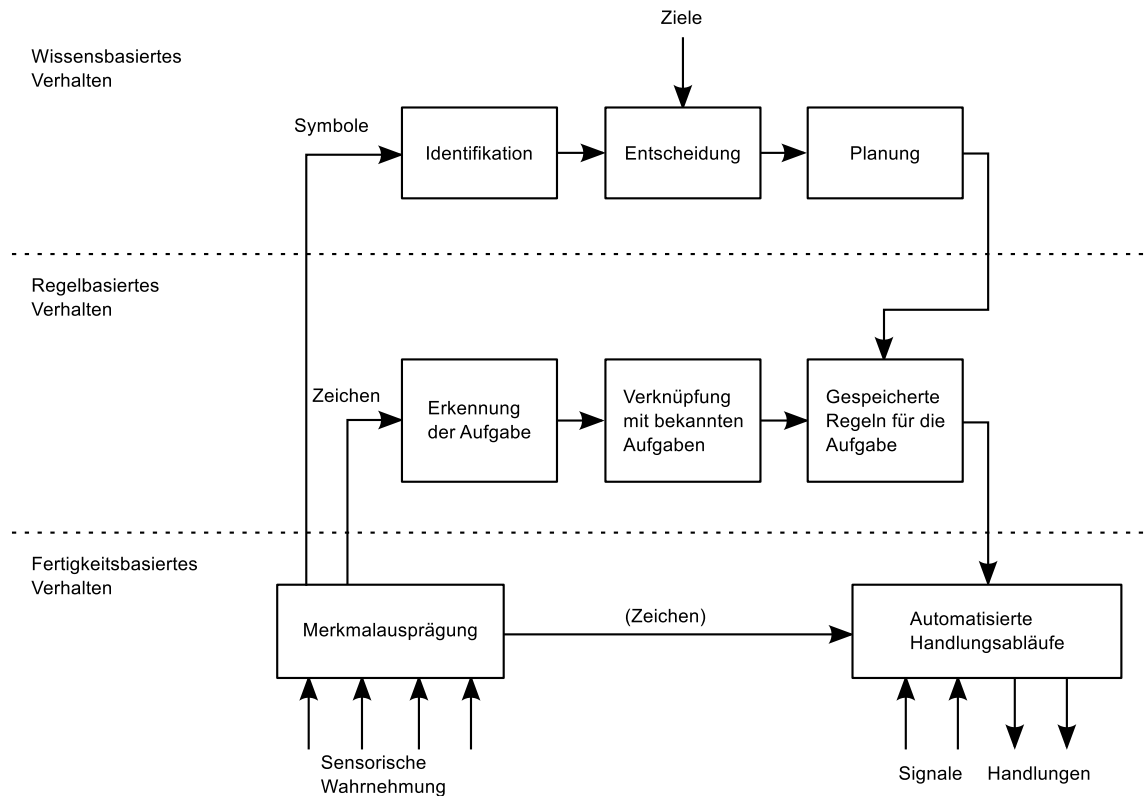


Abbildung 2.3: Menschliches Verhaltensmodell nach Rasmussen (1983)

Das Überholen eines anderen Verkehrsteilnehmers ist eine auf regelbasiertem Verhalten beruhende Handlung. So wird der Vorgang nur ab einer gewissen Differenzgeschwindigkeit durchgeführt. Ausscheren und Schalten finden als Elementarhandlungen statt.

Wissensbasiertes Verhalten: In unbekanntem Situationen, für die weder erlerntes Wissen noch Regeln existieren, muss die Planung der Handlung auf einer hohen geistigen Ebene stattfinden. Auf dieser wissensbasierten Ebene finden alle Handlungen bewusst statt. Es werden der unbekanntem Situation angepasste Vorgehensstrategien entwickelt. Da keine bekannten Handlungsmuster auf die Situation angewendet werden können, basieren die erstellten Handlungsalternativen auf gelernten Erfahrungen, die auf die aktuelle Situation angepasst werden. Diese werden mental auf ihre Anwendbarkeit geprüft, indem die resultierenden Effekte vorhergesagt und mit dem erwünschten Ziel verglichen werden. Es wird über die passend erscheinende Handlung *entschieden* und diese zur *Planung* ausgewählt. Da hier komplexe Variationen zukünftiger Szenarien, basierend auf den möglichen Handlungsalternativen, prognostiziert werden, ist die mentale Beanspruchung in dieser Ebene am höchsten (Rasmussen, 1983).

Das Erlernen des Schaltvorgangs in der Fahrschule beginnt auf der wissensbasierten Ebene. So werden das Drücken der Kupplung und das anschließende Bewegen des Wählhebels bewusst durchgeführt. Durch häufiges Wiederholen und Üben verlagert sich dieser Vorgang schließlich auf die fertigkeitbasierte Ebene.

Die Aufteilungen der primären Fahraufgabe in das Drei-Ebenen-Modell nach Donges (1982) sowie der Regulationsebenen nach Rasmussen (1983) jeweils auf drei Ebenen legen nahe, dass sich diese einander zuordnen lassen. So zeigt Abbildung 2.4 ein vereintes Modell.

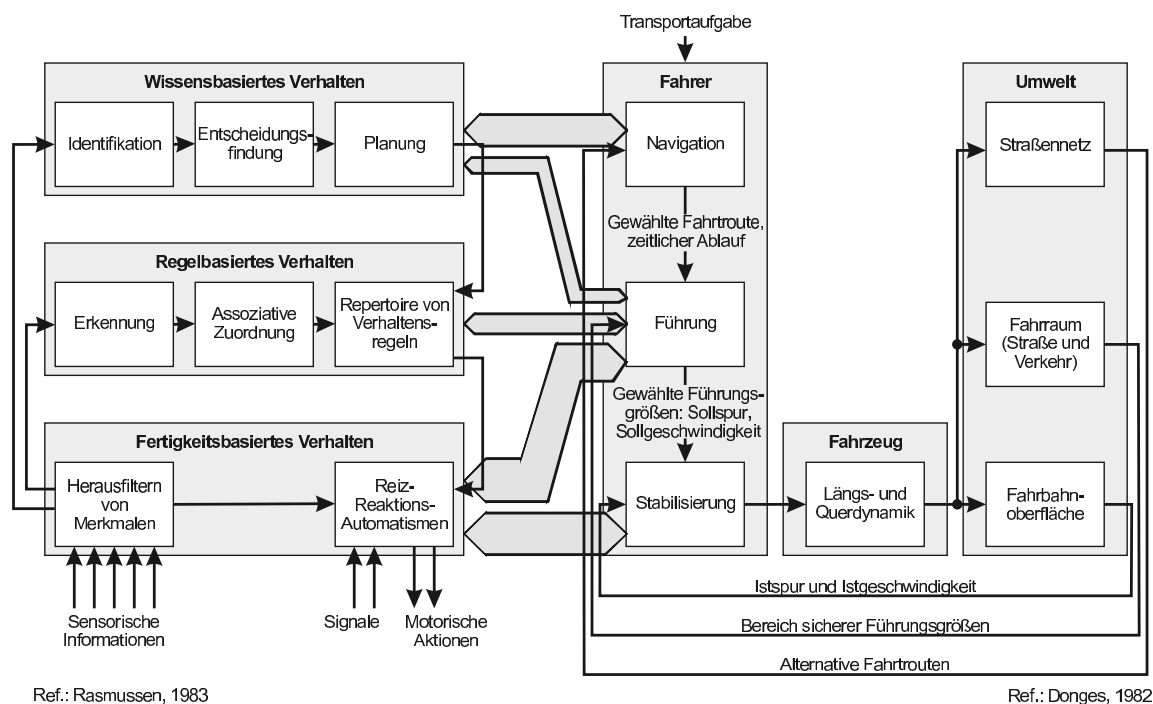


Abbildung 2.4: Verknüpfung des Drei-Ebenen-Modells der Fahrzeugführung mit dem menschlichen Verhaltensmodell (entnommen aus Donges, 2012)

Hierbei lässt sich erkennen, dass eine eindeutige Zuordnung der Ebenen von Rasmussen denen von Donges nicht möglich ist. Zwar werden Aufgaben der Stabilisierungsebene häufig durch fertigkeitbasiertes Verhalten durchgeführt, jedoch gibt es Fälle, in denen die Stabilisierungsaufgabe dem regelbasierten oder sogar wissensbasierten Verhalten zugeschrieben werden muss (vgl. Tabelle 2.1).



Tabelle 2.1: Beispiele für die Zusammenhänge des SRK-Modells mit den Ebenen der Fahraufgabe (Hale et al., 1990, übersetzt nach Lange, 2008)

	WISSENSBASIIERT	REGELBASIIERT	FERTIGKEITSBASIIERT
NAVIGATIONSEBENE	Zurechtfinden in einer fremden Stadt	Wahl zwischen vertrauten Wegen	Täglicher Weg zur Arbeit
FÜHRUNGSEBENE	Steuern auf schneebedeckter oder vereister Fahrbahn	Überholen anderer Fahrzeuge, Fahrstreifenwechsel	Abbiegen an einer Kreuzung
STABILISIERUNGSEBENE	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde	Ein ungewohntes Auto fahren	Kurve fahren, Kuppeln und Schalten

Lange (2008) stellt jedoch heraus, dass Aufgaben der Navigationsebene hauptsächlich auf der wissensbasierten, Aufgaben der Führungsebene auf der regelbasierten und Aufgaben der Stabilisierungsebene auf der fertigkeitbasierten Ebene stattfinden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein alternatives Bedienkonzept für die primäre Fahraufgabe zu entwickeln, kann nun mithilfe der vorgestellten Modelle genauer spezifiziert werden. Um eine manuelle Fahrzeugführung zu ermöglichen, muss das neuartige Konzept einen Eingriff auf der Stabilisierungsebene bewirken. Darüber hinaus soll das zugrundeliegende Stellteil die Informationsaufnahme fahrrelevanter Informationen unterstützen und somit dem Fahrer die Regelung des Fahrzeugs erleichtern.



3 Aktive Stellteile

Nach Rühmann (1993) dienen Stellteile der Übertragung der aus mentalen Verarbeitungsprozessen gewonnenen Information auf die Maschine. Dadurch kann eine Änderung des Maschinenverhaltens vorgenommen werden. So kann z. B. der Fahrer beim Kraftfahrzeug den Lenkwinkel der mechanisch verbundenen Vorderräder durch Aufbringen eines Moments auf das Lenkrad verändern. Doch dabei werden nicht nur Informationen von dem Fahrer an das Fahrzeug übermittelt, sondern der Fahrer kann über das Lenkrad auch eine Vielzahl an Informationen erhalten. Beispielsweise gibt die Stellung des Lenkrads den Einschlagwinkel der Vorderräder wieder und Vibrationen geben Aufschluss über die Fahrbahnbeschaffenheit.

Mit dem Fortschritt auf dem Gebiet der Elektronik ist es heute möglich, eine mechanische Verbindung zwischen Stellteil und Regelstrecke zu trennen und durch eine elektronische Verbindung zu ersetzen. Dabei werden die Informationen von dem Bediener durch Sensoren am Stellteil aufgenommen und als elektrisches Signal an ein Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät wertet diese Daten aus und koordiniert einen angeschlossenen Aktuator, der eine mechanische Kraft entsprechend der Eingabe des Bedieners aufbringt.

Somit wird der Informationsfluss vom Menschen zur Maschine ermöglicht. Das Stellteil verhält sich in dieser Konfiguration wie ein Feder-Dämpfer-Masse-System, dessen Eigenschaften konstruktionsbedingt sind. Dieses, auch als *passives Stellteil* bezeichnete Bedienelement, erlaubt keine Änderung seines Verhaltens, da sich weder Federsteifigkeit noch Dämpfung oder Masse während des Betriebs ändern lassen.

Es existieren eine Reihe passiver Stellteile, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Sie lassen sich, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, klassifizieren (Eckstein, 2001). Dabei zeichnen sich *isomorphe* und *isotonische* Stellteile dadurch aus, dass die durch den Bediener erzeugte Auslenkung des Bedienelements als Stellgröße interpretiert wird. Das *isometrische* Bedienelement hingegen erlaubt keine Bewegung. Die Stellgröße wird durch integrierte Kraftsensoren ermittelt.



Tabelle 3.1: Klassifikation von passiven Stellteilen (Eckstein, 2001)

STELLTEILTYP	SOLLWERT	RÜCKMELDUNG	BEISPIEL
isomorph	Winkel oder Weg	Kraft = $f(\text{Winkel})$	federzentrierter Computer-Joystick
isotonisch	Winkel oder Weg	Kraft = konstant	Lautstärke-Knopf am Musikverstärker
isometrisch	Kraft	Winkel bzw. Weg unveränderlich	Maus-Steuerelement bei einigen tragbaren Computern

Gibbs (1954) erkennt, dass ein isometrisches Stellteil mit Erzeugung der Stellgröße durch Kraftmessung bei Kompensationsaufgaben signifikante Vorteile bietet. Diese begründen sich darin, dass Massenträgheiten des Hand-Arm-Systems sowie des Bedienelements entfallen. Allerdings sind Informationen über die durchgeführte Eingabe durch die fehlende Bewegung des Stellteils nur in geringem Maße wahrnehmbar. Daher fordert Gibbs eine direkte Rückmeldung des auf die Regelstrecke ausgeübten Einflusses.

Um das Defizit des unidirektionalen Informationsaustausches dieser Stellteile zu beheben und einen Informationsfluss von der Maschine zum Menschen zu ermöglichen, zeigt Herzog (1968) einen ersten Lösungsansatz. Er schlägt vor, die vom Bediener aufgebrachte Kraft am Stellteil als Stellgröße zu nutzen, um die Regelstrecke zu manipulieren. Um das Verhalten der Regelstrecke wahrzunehmen, sollte das Bedienelement mechanisch an die Regelstrecke angepasst werden. Dies kann durch Veränderung der Federsteifigkeit und der Dämpfung bewerkstelligt werden. Bei genauer Anpassung verhält sich das Stellteil somit wie die Regelstrecke.

Dieses Prinzip funktioniert allerdings nur bei einem gleichbleibenden Regelstreckenverhalten. Ändert sich der Zustand abhängig von äußeren Einflüssen, so entsteht eine Diskrepanz zwischen der Regelstrecke und dem Stellteil.

Dieser Problematik entgegen Herzog (1969, zitiert nach Eckstein, 2001) und Merhav und Ya'Acov (1976) durch die Einführung eines Stellteils mit integriertem Aktuator. Diese Bedienelemente, auch als *aktive Stellteile* bekannt, können definierte Kräfte bzw. Momente erzeugen. So kann durch Veränderung der Momente während des Betriebs das Verhalten des Stellteils dynamisch an die Regelstrecke angepasst werden.

Um das Prinzip anschaulich darzustellen, wird zunächst auf den generischen Mensch-Maschine-Regelkreis aus Abbildung 3.1 eingegangen, der die direkte Manipulation eines Gegenstands darstellt. Im Anschluss wird dieser Regelkreis modifiziert, um den Informationsfluss zwischen Mensch und Maschine bei der Benutzung eines passiven sowie aktiven Stellteils zu veranschaulichen.

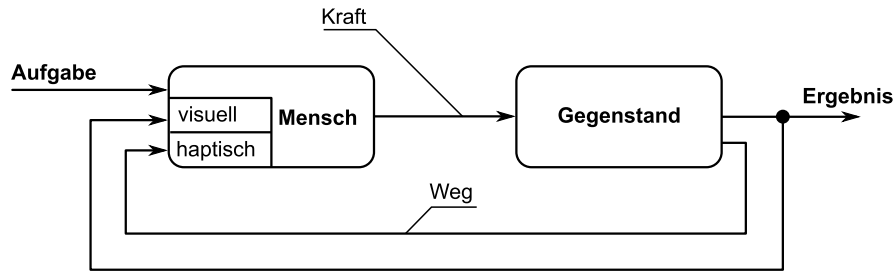


Abbildung 3.1: Allgemeiner Mensch-Maschine-Regelkreis (Penka, 2001)

Um einen Einfluss auf einen Gegenstand (oder allgemein ein System) auszuüben, bringt der Mensch mit seiner Muskulatur Kraft auf. Abhängig von den Eigenschaften des Gegenstands (z. B. Gewicht, Reibung, ...) sowie Betrag und Richtung der aufbrachten Kraft, beginnt sich das System zu verändern. Es tritt eine Bewegung auf, die der Mensch wahrnimmt. Die Aufgabe, z. B. den Gegenstand zielgenau zu platzieren, wird von ihm kontinuierlich mit dem Ergebnis seiner Handlungen verglichen. Solange der Gegenstand nicht auf seinem Zielort steht, wird er den Gegenstand weiterhin manipulieren. Nähert sich der Gegenstand seinem Bestimmungsort, so beginnt der Mensch Kräfte entgegen der Bewegungsrichtung aufzubauen. Dadurch verringert sich die Geschwindigkeit bis der Gegenstand schließlich zum Stehen kommt.

Die trivial scheinende Tätigkeit erfordert ein hohes Maß an mentaler Leistung, da der Gegenstand bereits vor dem gewünschten Zielort durch Aufbringen einer entgegengesetzten Kraft verzögert werden muss. Ermöglicht wird diese Leistung durch die bereits seit der Kindheit erlernten sensomotorischen Fähigkeiten und den Aufbau innerer Modelle (Lindsay & Norman, 1972; Bubb, 1977). Diese Modelle ermöglichen es dem Menschen, das Verhalten des Gegenstandes auf die aufbrachte Kraft vorherzusagen und somit den Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem der Gegenstand verzögert werden muss.

Bei der Bedienung einer Maschine erfolgt die Manipulation mithilfe eines Bedienelements. In Abbildung 3.2 ist der Mensch-Maschine-Regelkreis mit passivem, isomorphen Stellteil dargestellt.

Um die Maschine zu manipulieren, bringt der Mensch eine Kraft auf das Bedienelement auf. Abhängig von den integrierten Feder- und Dämpferelementen bewegt sich das Stellteil aus der Ruhelage. Der Ausschlag ist proportional zur aufbrachten Kraft und ist durch das Kräftegleichgewicht von Bedienkraft und Rückstellkraft gekennzeichnet. Die Auslenkung wird durch einen Winkelsensor erfasst, in ein elektrisches Signal gewandelt und an das Steuergerät der Maschine übermittelt. Das Steuergerät interpretiert die Sensordaten und ändert entsprechend das Verhalten

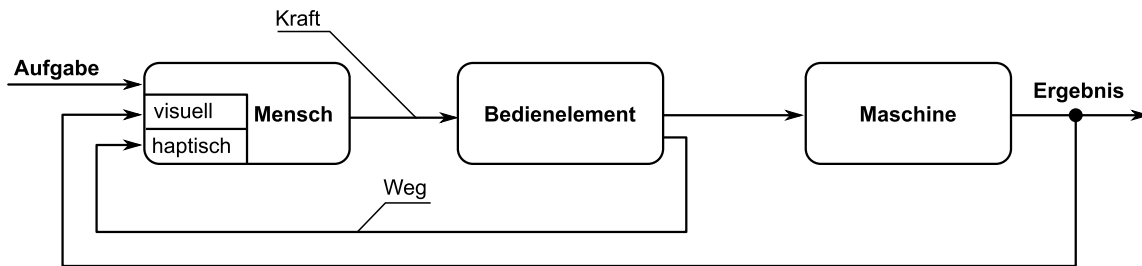


Abbildung 3.2: Mensch-Maschine-Regelkreis mit passivem Stellteil (Penka, 2001)

der Maschine. Da der Mensch nur Kontakt mit dem Stellteil hat, nimmt er haptisch lediglich das Verhalten des Bedienelements wahr. Die Dynamik des passiven Bedienelements hat jedoch keinen Bezug zur Regelstrecke, sondern bewegt sich nach seinen Eigenschaften als Feder-Dämpfer-Masse-System. Wie in Abbildung 3.2 erkennbar ist, reduziert sich die Informationsaufnahme über das Verhalten der Maschine auf den visuellen Kanal.

Um die Bedienung der Maschine zu verbessern, kann das Bedienelement mit einem Aktuator versehen werden. Das dadurch entstehende aktive Stellteil kann auf zwei Arten betrieben werden:

Force-Feedback: Das Bedienelement besitzt als Grundkonfiguration eine Feder-Dämpfer-Masse-Kennlinie. Bringt der Bediener Kraft auf das Stellteil auf, so ändert sich dessen Position. Durch die integrierten Sensoren wird die Stellung detektiert und als Stellgröße an die Maschine übermittelt. Der aktuelle Zustand der Regelstrecke wird gemessen und als zusätzliche Kraft zur Kennlinie am Stellteil wiedergegeben.

Position-Feedback: Das aktive Stellteil mit Wegrückführung nutzt das umgekehrte Prinzip. Es wird die aufgebrachte Kraft des Bedieners durch Sensoren detektiert und als Stellgröße an die Maschine übertragen. Das Bedienelement ist dabei durch den Benutzer nicht bewegbar. Der Zustand der Regelstrecke wird gemessen, in die Stellgröße transformiert und an das Steuergerät des Stellteils übertragen. Der Aktuator des Bedienelements arbeitet in diesem Fall als Servomotor und bewegt sich an die, gemäß der Stellgröße, vorgegebene Position.

Merhav und Ya'Acov (1976) weisen eine signifikante Verringerung des Workloads durch die Verwendung eines aktiven Stellteils mit Wegrückführung nach. Besonders bei instabilen Regelstrecken und Regelstrecken höherer Ordnung zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Stabilisierungsleistung. Allerdings sei das Prinzip bei

zu hohen Frequenzen nicht mehr einsetzbar. Boller und Krüger (1978) stellen fest, dass dieser Sachverhalt auch für zu niedrige Frequenzen zutrifft.

Gillet (1999) stellt heraus, dass der spürbare Unterschied der beiden Varianten bei perfekter Auslegung verschwinden sollte. Allerdings räumt er ein, dass in der Realität aufgrund von Grenzwerten (z. B. Kraft) und elektromechanischen Unzulänglichkeiten (z. B. Reibung) eine Abweichung des Verhaltens bestehen bleibt.

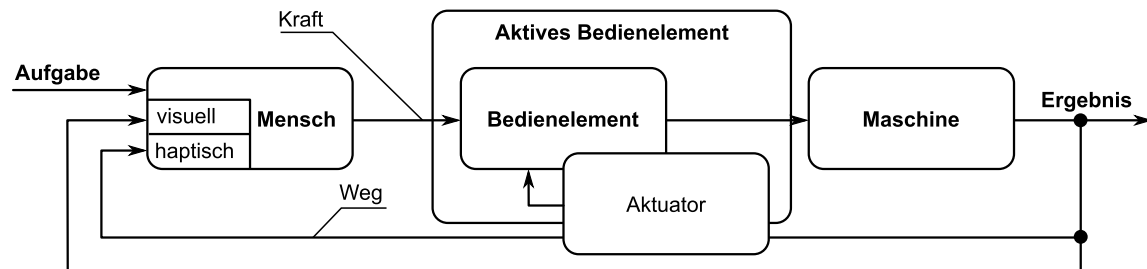


Abbildung 3.3: Mensch-Maschine-Regelkreis mit aktivem Stellteil mit Wegrückführung (Penka, 2001)

Der Mensch-Maschine-Regelkreis mit aktivem Stellteil mit Wegrückführung ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Um die Maschine zu beeinflussen, bringt der Mensch eine Kraft auf das Stellteil auf. Deren Betrag sowie die Richtung werden erfasst und als elektrisches Signal an das Steuergerät der Maschine weitergeleitet. Nach der Interpretation der übermittelten Stellgrößen wird die Maschine entsprechend manipuliert und beginnt sich zu verändern. Diese Änderung wird durch Sensoren erfasst und zurück an das Bedienelement übermittelt. Der Aktuator des Stellteils bewegt den Griff an die dem Zustand der Regelstrecke entsprechende Position, was vom Menschen als Bewegung des Stellteils wahrgenommen wird. Da ein direkter Bezug zwischen Bewegung der Regelstrecke und Bewegung des Bedienelements hergestellt wird, kann hier auf die erlernten sensomotorischen Fähigkeiten zurückgegriffen werden (vgl. Bubb, 1977).

Um dieses Potential auszuschöpfen, basieren die in der vorliegenden Arbeit entwickelten und untersuchten alternativen Bedienkonzepte auf dem Prinzip des aktiven Stellteils.



4 Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen

Hinter dem Begriff der Fahrerassistenz verbergen sich heute eine Vielzahl von Systemen, die den Fahrer bei der Fahraufgabe unterstützen. Dabei unterscheiden sie sich in der Aufgabe, die sie erfüllen. Während einige Systeme, wie z. B. die Klimaautomatik die tertiäre Fahraufgabe adressieren, übernehmen andere Aufgaben der sekundären oder primären Fahraufgabe. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden auf Klassifizierungen von Assistenzsystemen der primären Fahraufgabe eingegangen.

Das Spektrum reicht dabei von Systemen, die nur in Notsituationen eingreifen, bis hin zu solchen, die Teile der Fahraufgabe längerfristig und vollständig übernehmen. Die Funktion dieser, häufig als ADAS¹ abgekürzten, Systeme ist allerdings auf einen definierten Anwendungsfall und innerhalb definierter Grenzen beschränkt (Rauch et al., 2012).

Doch nicht nur unter dem Aspekt des Funktionsumfangs bzw. Automationsgrads lassen sich heutige Fahrerassistenzsysteme klassifizieren. Auch in der regelungstechnischen Anordnung von Fahrer und Assistenzsystem unterscheiden sich die existierenden Systeme.

Im Folgenden werden einige Klassifizierungen aus der Literatur, basierend auf den Aspekten *Anordnung* und *Funktion*, vorgestellt.

4.1 Anordnung

Kraiss (1998) stellt eine Klassifizierung des Automationsgrads vor, die auf der Arbeitsteilung von Mensch und Maschine basiert. Er unterscheidet dabei eine *serielle*, *redundant parallele* und *nicht redundant parallele* Organisation. Während sich die *serielle* Arbeitsteilung durch die zeitlich alternierende Bearbeitung unterschiedlicher

¹Advanced Driver Assistance Systems



Aufgaben von Mensch und Maschine auszeichnet, beschreibt die *nicht redundant parallele* Form der Arbeitsteilung die gleichzeitige Ausführung der unterschiedlichen Aufgaben. Bei der *redundant parallelen* Funktionsteilung hingegen nehmen der Mensch und die Maschine gleichzeitig dieselbe Aufgabe wahr.

Es fällt auf, dass diese dreiteilige Klassifizierung der Automationsgrade nur eine grobe Einteilung ermöglicht. So lassen sich Fahrerassistenzsysteme, die parallel zum Fahrer die gleiche Aufgabe ausführen, nicht weiter unterteilen. Ein System, das dauerhaft überwacht, allerdings nur unter gewissen Umständen die Eingaben des Fahrers überstimmt fällt ebenso in die Kategorie der *redundant parallelen* Form, wie ein System, das den Fahrer dauerhaft unterstützt.

Bei genauerer Betrachtung kommen somit zwei Kriterien zum Tragen. Zum einen die regelungstechnische Verschaltung von Mensch und Maschine im Sinne des Mensch-Maschine-Regelkreises (vgl. Kapitel 2) und zum anderen der zeitliche Aspekt der Unterstützung.

Eine Lösung bieten Hakuli et al. (2012) durch die Einführung einer zweidimensionalen Klassifizierung. Sie bezeichnen dabei diese beiden Kriterien als Anordnung und zeitliche Wirkreihenfolge.

Das Kriterium der *Anordnung* bezieht sich auf den regelungstechnischen Signalfluss. Dieser kann in *seriell* und *parallel* unterteilt werden. Bei der *seriellen* Assistenz gibt der Fahrer Informationen an das Assistenzsystem, das die Aktion ausführt. Der Fahrer hat keinen direkten Einfluss auf die Fahrzeugführung, sondern kann das Fahrzeug lediglich über das Assistenzsystem beeinflussen. Jegliche Kontrolle, die der Fahrer wahrnimmt, findet somit über das Assistenzsystem statt. Die *parallele* Assistenz hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass das technische System und der Fahrer an gleicher Stelle im Regelkreis stehen, d. h., keiner ist dem anderen zwangsläufig untergeordnet. Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen den Signalfluss bei Verwendung eines parallel arbeitenden Assistenzsystems.

Die *zeitliche Wirkreihenfolge* des Assistenzsystems kann als *simultane* oder *sequenzielle* Assistenz ausgelegt sein. Dabei charakterisiert eine *simultane* Assistenz die sofortige Umsetzung der Fahrereingaben. So wirkt im Fall einer parallelen Anordnung der Eingriff des Fahrers sofort auf die Fahrzeugführung ein (s. Abbildung 4.1). Bei der seriellen Assistenz werden die Eingaben des Fahrers ohne Zeitverzug von dem Assistenzsystem ausgeführt.

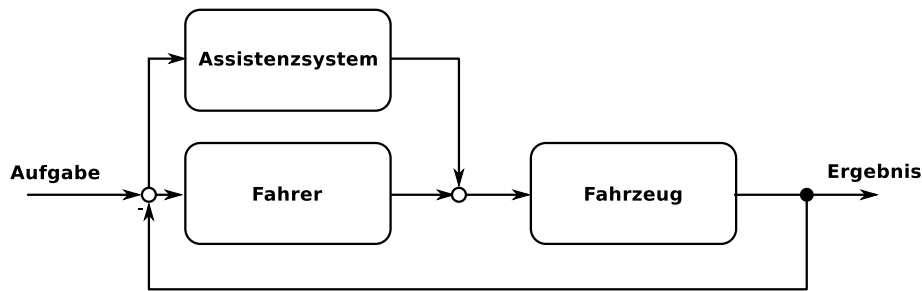


Abbildung 4.1: Vereinfachter Mensch-Maschine-Regelkreis mit parallel-simultaner Assistenz basierend auf Hakuli et al. (2012)

Im Fall einer *sequenziellen* Assistenz greift entweder der Fahrer oder das Assistenzsystem auf die Fahrzeugführung ein (s. Abbildung 4.2). Dabei wird bei serieller Assistenz die Automation mit der Fahraufgabe betraut, während der Fahrer ereignisdiskret auf die Fahrzeugführung einwirkt. Er beauftragt Manöver, die das Assistenzsystem ausführt.

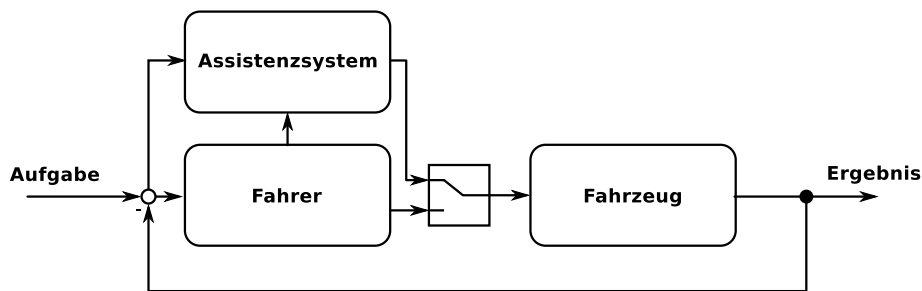


Abbildung 4.2: Vereinfachter Mensch-Maschine-Regelkreis mit parallel-sequenzieller Assistenz basierend auf Hakuli et al. (2012)

4.2 Funktion

In der Literatur existieren in unterschiedlichen Domänen zahlreiche Klassifikationen des Automationsgrads nach ihrer Funktion. So teilen Sheridan und Verplank (1978) im Kontext der Steuerung von Unterwasserfahrzeugen den Grad einer Automation basierend auf dem Informationsverarbeitungsprozess des Menschen in zehn Stufen ein. Diese unterscheiden sich lediglich auf der Ebene der Informationsverarbeitung durch den Grad der Involvierung der Automation bei der Generierung und Auswahl von Handlungsalternativen. Charakteristisch ist bei dieser Einteilung, dass die Informationsumsetzung immer ausschließlich und vollständig von der Automation durchgeführt wird.



Endsley (1987, zitiert nach Endsley, 1999) teilt die Automation in fünf Stufen, denen ebenfalls der Informationsverarbeitungsprozess zugrunde liegt. Zwölf Jahre später erweitert sie die Klassifizierung auf zehn Automationsstufen (Endsley, 1999).

Parasuraman, Sheridan und Wickens (2000) schlagen ebenfalls eine einfache Unterteilung des Automationsgrads gemäß des Informationsverarbeitungsprozesses vor.

Eine genaue Einteilung heutiger Assistenzsysteme in diese Automationsgrade ist nicht möglich. Dadurch, dass sehr viele Systeme auf unterschiedliche Weise in die Fahrzeugführung eingreifen, wird eine genauere Aufteilung der Informationsumsetzung nötig.

Im Bereich der Fahrzeugführung stellt Gründl (2005) eine Einteilung bezüglich des Grades der Unterstützung vor und unterscheidet dabei die vier Stufen: *Information*, *Warnung*, *korrigierender Eingriff* und *Übernahme der Fahraufgabe*. Die Informationsumsetzung wird innerhalb dieser Klassifizierung in zwei Stufen eingeteilt. Dadurch ist eine genauere Einteilung zwar möglich, doch besteht auch hier das Problem, dass sich ein großer Teil heutiger Assistenzsysteme immer noch nur auf der einen Ebene „korrigierender Eingriff“ wiederfinden. Somit scheint diese Aufteilung noch nicht ausreichend, da auch hier keine genaue Einteilung der Fahrerassistenzsysteme möglich ist.

Flemisch, Kelsch, Löper, Schieben und Schindler (2008) führen ein einfaches eindimensionales Automationspektrum ein, das eine genauere Klassifizierung ermöglicht. Sie definieren hierbei die fünf Stufen: *manuell*, *assistiert*, *semiautomatisiert*, *hochautomatisiert* und *vollautomatisiert*. Schieben, Damböck, Kelsch, Rausch und Flemisch (2008) zeigen, dass mit diesem Modell auch Übergänge einzelner Automationsgrade modelliert werden können. Dabei können diese sogenannten Transitionen sowohl vom Fahrer als auch von der Automation initiiert werden.

Die verbreitetste Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen wird von einer Projektgruppe der BASt² eingeführt (Gasser, 2012). Diese teilt den Grad der Automation in die fünf Stufen: „*driver only*“, *assistiert*, *teilautomatisiert*, *hochautomatisiert* und *vollautomatisiert*. Wichtig ist hier zu erwähnen, dass sich die Stufen *assistiert* und *hochautomatisiert* von der in Flemisch et al. (2008) eingeführten gleichnamigen Klassifikation unterscheiden. Die NHTSA (2013)³ benennt eine identische Klassifizierung in den USA.

²Bundesanstalt für Straßenwesen

³National Highway Traffic Safety Administration



Damböck (2013, S. 45) erweitert die Klassifizierung der BASt, da Fahrerassistenzsysteme, „die nur unter bestimmten Bedingungen, wie beispielsweise einer Gefährdung, in die Fahrzeugführung eingreifen [...] nicht zugeordnet werden“ können. Tabelle 4.1 zeigt das nach Damböck (2013) erweiterte Automationspektrum, das im Folgenden erklärt wird:

„Driver only“: Mit „driver only“ wird der Automationsgrad bezeichnet, in dem kein Assistenzsystem an der Fahrzeugführung beteiligt ist. Unterstützende Systeme, die nicht in die primäre Fahraufgabe eingreifen, wie z. B. Automatikgetriebe, sind auf dieser Ebene eingeschlossen.

Unterstützt: Hier greifen Assistenzsysteme in die primäre Fahraufgabe ein. Allerdings nehmen diese lediglich korrigierende Eingriffe auf der Stabilisierungsebene vor, um das Fahrzeug stabil und sicher zu halten. Die Fahrzeugführung liegt weiterhin in der Hand des Fahrers.

Informiert: Das Assistenzsystem informiert den Fahrer über den aktuellen Zustand des Systems. In kritischen Situationen warnt das System den Fahrer zusätzlich.

Assistiert: In diesem Automationsgrad wirken die Assistenzsysteme aktiv auf die Fahrzeugführung ein. Allerdings beschränkt sich dieser Eingriff auf einen kurzen Zeitraum, um gefährliche Situationen zu vermeiden.

Semiautomatisiert: Das Fahrzeug nimmt die Längs- oder Querführung der Fahraufgabe dauerhaft wahr. Die zweite, verbleibende Dimension der Fahraufgabe übernimmt weiterhin der Fahrer. Das Assistenzsystem kann selbstständig keine Systemgrenzen erkennen und muss somit vom Fahrer dauerhaft überwacht werden. Da keine Warnung vor dem Erreichen der Grenze erscheint, muss der Fahrer jederzeit in der Lage sein, die gesamte Fahraufgabe zu übernehmen.

Manöverautomatisiert: Die Automation übernimmt die gesamte Fahraufgabe für einen gewissen Zeitraum. Dabei beauftragt der Fahrer Manöver, die die Automation ausführt. Da das System selbstständig keine Systemgrenzen erkennen kann, muss der Fahrer das System auch in der manöverautomatisierten Fahrzeugführung dauerhaft überwachen und jederzeit in der Lage sein, die Fahrzeugführung vollständig zu übernehmen.

Teilautomatisiert: Das Fahrzeug übernimmt die Längs- und Querführung für einen gewissen Zeitraum. Da das System auch hier keine Systemgrenzen erkennen kann, muss es der Fahrer dauerhaft überwachen und die Fahraufgabe jederzeit übernehmen können.



Tabelle 4.1: Nomenklatur und Beschreibung der Fahrerassistenz- bzw. Automationsysteme (Damböck, 2013)

BENENNUNG	FÄHIGKEITEN DER AUTOMATION / ASSISTENZ	ROLLE DES FAHRERS
„Driver only“	<ul style="list-style-type: none"> Kein System aktiv 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus und hat die alleinige Kontrolle über das Fahrzeug.
Unterstützt	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung durch konventionelle Assistenzsysteme (z. B. Fahrdynamikregelung) 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Informiert	<ul style="list-style-type: none"> Informierung und notfalls Warnung des Fahrers durch Assistenzsysteme mit Umfelderkennung (z. B. Spurverlassenswarner). 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Assistiert	<ul style="list-style-type: none"> Automationssysteme mit Umfelderkennung können in bestimmten Situationen aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, um den Fahrer zu unterstützen (z. B. Spurhalteunterstützung). 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus.
Semiautomatisiert	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt dauerhaft Quer- oder Längsführung innerhalb gewisser Grenzen (z. B. Abstandsregeltempomat). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer übernimmt nur eine Dimension der Fahraufgabe. Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Manöverautomatisiert	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung zur Ausführung vorgegebener Manöver (z. B. Conduct-by-Wire; Winner et al., 2006). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer kommandiert die auszuführenden Manöver. Der Fahrer muss die Funktionen des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Teilautomatisiert	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnassistent; vgl. Gasser, 2012). Systemgrenzen werden nicht erkannt. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein.
Hochautomatisiert	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnchauffeur; vgl. Gasser, 2012) Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Das System ist nicht in der Lage in jeder Situation den risikominimalen Zustand herbeizuführen. Wenn der Fahrer die Fahraufgabe übernehmen muss, stellt das System ihm genug Zeit zur Verfügung. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems <i>nicht</i> dauerhaft überwachen. Der Fahrer muss die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen.
Vollautomatisiert	<ul style="list-style-type: none"> Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall (z. B. Autobahnpiilot; vgl. Gasser, 2012). Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Bei ausbleibendem Eingreifen des Fahrers ist das System in der Lage den risikominimalen Zustand herbeizuführen. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Fahrer muss die Funktion des Systems <i>nicht</i> überwachen. Der Fahrer kann die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen.



Hochautomatisiert: Auch hier übernimmt die Automation die Längs- und Querführung. Allerdings werden Systemgrenzen erkannt und der Fahrer wird mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme aufgefordert. Das System kann nicht in jeder Situation den risikominimalen Zustand herbeiführen. Da das System zur Übernahme auffordert, muss es der Fahrer nicht permanent überwachen. Die Übernahme an Systemgrenzen ist jedoch erforderlich.

Vollautomatisiert: Das Fahrzeug übernimmt die Fahraufgabe. Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer wird rechtzeitig aufgefordert, die Fahraufgabe zu übernehmen. Da bei Ausbleiben des Fahrereingriffs vom System der risikominimale Zustand herbeigeführt wird, muss der Fahrer die Funktionen des Systems nicht überwachen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf das von Damböck (2013) erweiterte Automationspektrum zurückgegriffen.



5 Stand der Technik

Eine Klassifizierung heutiger aktiver Fahrerassistenzsysteme in die Automationsgrade nach Damböck (2013) offenbart eine Vielzahl unterschiedlich ausgeprägter Systeme, die den Bereich vom unterstützten bis semiautomatisierten Fahren abdecken.

In den 70er Jahren wurden zunächst Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit entwickelt. Diese sollten vor dem tatsächlich auftretenden Unfall eingreifen, um diesen zu verhindern oder zumindest dessen Folgen abzuschwächen. So wurde 1978 das erste elektronische Antiblockiersystem (ABS) von Bosch auf den Markt gebracht. Auch wenn dieses System den Systemzustand des Fahrzeugs dauerhaft überwacht, wirkt es nur unter gewissen Bedingungen unterstützend auf der Stabilisierungsebene ein. Beginnt das Fahrzeug beim Bremsen auf glatter Fahrbahn zu rutschen, so greift das ABS in den Bremsvorgang ein und verhindert durch vorübergehendes Verringern des Bremsdrucks das Blockieren der Räder (van Zanten & Kost, 2012; Bosch, 2014).

Seit 1995 werden die Fahrzeuge zunehmend mit dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) ausgestattet, das ein Schleudern des Fahrzeugs im Grenzbereich verhindert. Durch gezieltes Bremsen einzelner Räder erzeugt dieses System ein Drehmoment, das dem Gieren entgegenwirkt. Auch dieses System überwacht kontinuierlich den Systemzustand des Fahrzeugs und agiert auf der Stabilisierungsebene (van Zanten & Kost, 2012; Winner, Danner & Steinle, 2012).

Während diese Assistenzsysteme heute in jeder Fahrzeugklasse integriert werden, beschränken sich Fahrerassistenzsysteme, die auf der Bahnführungsebene wirken, noch größtenteils auf die Oberklasse oder obere Mittelklasse (vgl. Hakuli et al., 2012; Bartels, Steinmeyer, Brosig & Spichalsky, 2012; Geduld, 2012).

Seit 2001 wird der sogenannte Spurverlassenswarner in Nutzfahrzeugen angeboten. Dieses System stellt einen Vertreter der informierenden Assistenzsysteme dar, die auf der Bahnführungsebene unterstützen. Im aktivierten Zustand überwacht das System die Bewegung des Fahrzeugs durchgehend und warnt den Fahrer vor dem



bevorstehenden Verlassen des Fahrstreifens. Durch die Detektion der Fahrbahnmarkierungen und deren zeitliche Änderung der Position prognostiziert das System die Bewegung des Fahrzeugs relativ zum Fahrstreifen. Steht ein Überfahren der Markierung unmittelbar bevor, meldet sich das System durch akustische Signale oder durch Lenkradvibration (Dörner, Hipp & Schwertberger, 2012).

Die 2002 von Honda und Nissan vorgestellte Spurhalteunterstützung (LKAS¹) verkörpert eine abgewandelte Version des Spurverlassenswarners, die nicht nur vor dem Verlassen warnt, sondern auch aktiv in die Querführung eingreift. Es stellt somit einen Vertreter von Assistenzsystemen auf der Ebene „assistiert“ dar, dessen Eingriff von einer losen bis zu einer engen Führung im Fahrstreifen variieren kann (Gayko, 2012).

Heutige Systeme beschränken sich jedoch nicht nur auf den Eingriff in einer Gefahrensituation. Durch die zunehmende Bedeutung des Komfortaspekts bei den Automobilherstellern übernehmen aktuelle Assistenzsysteme vollständig und dauerhaft eine Teilaufgabe der Fahrzeugführung.

Den bekanntesten Vertreter dieser semiautomatisierten Fahrerassistenzsysteme stellt der Abstandsregeltempomat dar, auch als Adaptive Cruise Control (ACC) bekannt. Im aktivierten Zustand übernimmt dieses Assistenzsystem die gesamte Längsführungsaufgabe. Dabei regelt das System die Geschwindigkeit nach gewissen Vorgaben, deren Parameter durch Bedienelemente verändert werden können. So gibt der Fahrer die Zielgeschwindigkeit vor, die das System bei freier Fahrt einhält. Befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug im Sensorbereich, beginnt das System die Folgefahrt. Das Assistenzsystem nähert sich dem Sicherheitsabstand an und hält diesen selbstständig. Dieser Abstand kann durch das Einstellen der Zeitlücke vom Fahrer verändert werden und ergibt sich aus der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Beschleunigt das detektierte Fahrzeug, so beschleunigt das Assistenzsystem entsprechend bis zur vorgegebenen Zielgeschwindigkeit (Winner, Danner & Steinle, 2012).

Um eine Prognose zukünftiger Entwicklungen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme geben zu können, lohnt sich ein Blick auf die heutige Forschungslandschaft. So stellt Geyer (2013) heraus, dass sich der momentane Forschungsansatz auf die Optimierung existierender Assistenzsysteme und die Erhöhung der Nutzerakzeptanz konzentriert. Dabei stellen die Fahrerabsichtserkennung und die Entwicklung von Fahrermodellen die zentralen Kerne dar (Geyer, 2013).

¹Lane Keep Assist System



Im Kontext der zur Neige gehenden Ressourcen lässt sich eine weitere Forschungsrichtung feststellen. Konzepte für vorausschauende ACC-Systeme oder Projekte wie eCoMove² konzentrieren sich auf die Einsparung von Energie durch Unterstützung des Fahrers für eine vorausschauende Fahrweise und die Interaktion mit den umgebenden Verkehrsteilnehmern (eCoMove, 2010; Zlocki, 2010; Korzenietz, 2013).

Ein drittes erkennbares Forschungsfeld stellt die Kombination existierender, komplementierender Assistenzsysteme zu einem Gesamtsystem dar. So wird z. B. durch Kombination von ACC und eng geführtem LKAS die gesamte Fahraufgabe an das Fahrzeug übergeben (Geyer, 2013). Besonders in langweilig empfundenen Szenarien (z. B. Stauszenario) zeigt sich so ein Mehrwert für die Benutzer (Schaller, Schielen & Gradenegger, 2008).

Die Aktivierung beider Systeme stößt in den Bereich der nach BASt definierten teilautomatisierten Fahrzeugführung vor, da sowohl Längs- als auch Querführung an ein Assistenzsystem übergeben werden. Der Fahrer wird von der gesamten Fahrzeugführung entbunden, übernimmt allerdings die Überwachungsaufgabe und bleibt weiterhin in der Verantwortung. Er ist zwar von der grundlegenden Bedienung befreit, das Fahrzeug tatsächlich zu steuern, sieht sich allerdings mit neuen Aufgaben und Herausforderungen konfrontiert. Die zahlreichen Funktionen des Assistenzsystems verlangen von dem Fahrer die Bedienung einer neuen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Um mit diesem System sicher umgehen zu können, muss der Fahrer die Funktionen und auch die Grenzen des Assistenzsystems verstehen. Er muss die Handlungen antizipieren können und jederzeit in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen.

Dabei kann eine Übernahme auf verschiedene Weise stattfinden. Der Fahrer kann die Kontrolle *willentlich* übernehmen, indem er das Assistenzsystem deaktiviert. Es ist aber auch möglich, dass das Assistenzsystem an eine *Systemgrenze* stößt und somit der Fahrer gezwungen ist, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Den kritischsten Fall stellt jedoch eine *Fehlfunktion* des Systems dar, die der Fahrer rechtzeitig erkennen muss, um einer Eskalation zu entkommen und schwerwiegende Folgen zu verhindern.

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, ist es unabdingbar, dass sich der Bediener ein inneres Modell des Assistenzsystems aufbaut. Hat der Fahrer ein Gefühl für die Stärken und Schwächen sowie die Zuverlässigkeit des Systems entwickelt, kann er Vertrauen in das Assistenzsystem aufbauen, was die grundlegende Bedingung für die Akzeptanz dem System gegenüber darstellt (Lee & See, 2004). Besitzt das

²Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency



System kein hohes Maß an Stabilität und Zuverlässigkeit, bzw. ist die Verfügbarkeit gering, wird der Fahrer auf die Benutzung des Assistenzsystems verzichten und die Fahrzeugführung selbstständig durchführen.

Einen anderen Ansatz, in dem der Fahrer nicht nur eine reine Überwachungsaufgabe übernimmt, bietet die „kooperative Fahrzeugführung“ (vgl. Bengler, Zimmermann, Bortot, Kienle & Damböck, 2012). Sie stellt einen Spezialfall einer automatisierten Fahrzeugführung dar, bei der eine aktive Beteiligung von Fahrer und Automation an der Fahraufgabe gefordert wird. Im folgenden Kapitel wird auf die kooperative Fahrzeugführung näher eingegangen.



6 Auf dem Weg zum hochautomatisierten Fahren: Die Ansätze Conduct-by-Wire und H-Mode

Bei der kooperativen Fahrzeugführung werden sowohl Längs- als auch Querführung von der Automation wahrgenommen. Allerdings unterscheidet sie sich bereits im Grundgedanken von der Teilautomation, da hier der Fahrer nicht zur Überwachung des Systems degradiert wird, sondern gemeinsam mit der Automation die Aufgabe der Fahrzeugführung übernimmt. Automationseffekte, die durch die Entlastung des Bedieners und dessen damit einhergehenden Rückzug aus der Aufgabe von Endsley und Kiris (1995) in den Studien thematisiert werden, können durch das kooperative Zusammenspiel von Fahrer und Automation entschärft werden (Bengler & Flemisch, 2011). Dabei werden Informationen zwischen Mensch und Maschine ausgetauscht, Handlungsalternativen verhandelt und schließlich durch Konsens eine gemeinsame Handlung durchgeführt (Bengler et al., 2012). Verfolgen sowohl Fahrer als auch Automation dieselben Ziele, können diese durch die Zusammenarbeit der Partner schneller und einfacher erreicht werden (Biester, 2004).

Bereits Sheridan (1992) skizziert eine kooperative Kontrolle, die allerdings sehr einfach und einseitig ausgeprägt ist, da die Rollenverteilung zwischen Mensch und Maschine starr bleibt. Der Mensch initiiert die Handlung, die die Maschine ausführt.

Im Folgenden wird auf zwei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschungsprojekte näher eingegangen, die vielversprechende Ansätze der teilautomatisierten, kooperativen Fahrzeugführung verfolgen.

Der Ansatz von Conduct-by-Wire (CbW) wird von einer Arbeitsgruppe der Technischen Universität Darmstadt entwickelt. Das Institut für Arbeitswissenschaft konzentriert sich dabei auf die Interaktion zwischen Mensch und Maschine und untersucht geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen. Das Fachgebiet Fahrzeugtech-



nik untersucht die technischen Anforderungen und die Umsetzung des maschinellen Systems.

Das Projekt H-Mode wird von einer Forschergruppe am Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen und am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München bearbeitet.

6.1 Conduct-by-Wire

Der Grundgedanke von Conduct-by-Wire besteht darin, den Fahrer von der kontinuierlichen, auf Stabilisierungsebene stattfindenden Fahraufgabe zu entbinden (Winner et al., 2006). Stattdessen findet die Interaktion zwischen Fahrer und Automation auf der Bahnführungsebene statt. Dabei herrscht eine eindeutige Verteilung der Aufgaben und Verantwortung (Geyer, 2013). Der Fahrer beauftragt über eine spezielle Mensch-Maschine-Schnittstelle auf Bahnführungsebene ein Manöver. Die Automation berechnet die erforderliche Trajektorie und setzt diese schließlich auf der Stabilisierungsebene um. Durch eine kontinuierliche Rückmeldung des Systemzustands wird der Fahrer informiert und hat jederzeit die Möglichkeit, das aktive Manöver zu parametrieren oder gegebenenfalls abubrechen. Darüber hinaus kann er auf Wunsch mithilfe eines aktiven Stellteils auch auf der Stabilisierungsebene eingreifen. Dies hat jedoch die Deaktivierung der Automation zur Folge. Auf Bahnführungsebene handelt es sich bei CbW um ein sequenziell, seriell gestaltetes kooperatives System (Hakuli et al., 2012).

Das von Geyer (2013) eingeführte „Gate-Konzept“ verkörpert ein zentrales Paradigma von CbW. Diese als virtuelle Tore begreifbaren Gates liegen auf der geplanten Trajektorie des kooperativen Fahrzeugs und stellen Entscheidungspunkte dar, bis zu deren Überschreiten Entscheidungen des Fahrers getroffen und kommuniziert sein müssen.

Um den Signalfluss über das Stellteil visualisieren zu können, wird in Abbildung 6.1 eine eigene Darstellung des Conduct-by-Wire Konzepts präsentiert. Zum besseren Verständnis wird die Funktion im Folgenden am Beispiel eines Fahrstreifenwechsels auf der Autobahn erläutert. Im aktivierten Zustand übernimmt Conduct-by-Wire die Fahrzeugführung auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Solange der Fahrer keine Eingaben macht, folgt das System dem aktuellen Fahrstreifen. Möchte der Fahrer den Fahrstreifen wechseln, so teilt er der Automation das gewünschte Manöver auf der Bahnführungsebene über die Manöverschnittstelle mit (vgl. Franz, Kauer, Bruder & Geyer, 2012). Das System überprüft, ob die Bedingungen für einen

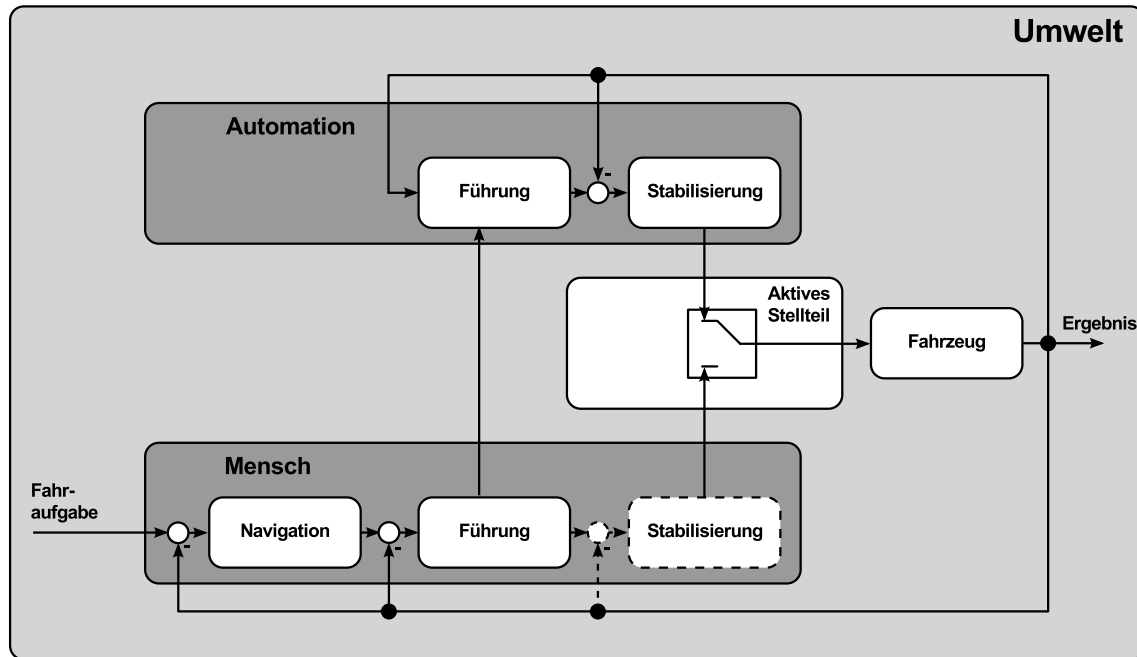


Abbildung 6.1: Manöverbasierte Fahrzeugführung nach dem CbW-Prinzip, basierend auf Geyer (2013)

Fahrstreifenwechsel erfüllt sind und führt im Anschluss das Manöver durch. Dabei plant CbW auf Führungsebene eine neue Trajektorie und greift auf Stabilisierungsebene in die Fahrzeugführung ein. Der Fahrer kann die Automation jederzeit explizit deaktivieren. Ein Eingriff auf Stabilisierungsebene über das aktive Stellteil deaktiviert die Automation ebenfalls und legt den Schalter im Regelkreis der Abbildung 6.1 zum Menschen hin um. Der Fahrer übernimmt in diesem Zustand auf Stabilisierungsebene die Kontrolle über das Fahrzeug.

6.2 H-Mode

Die Idee von H-Mode fußt auf der haptisch-multimodalen Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Dabei inspiriert die Interaktion eines Reiters mit seinem Pferd die zugrundeliegenden Interaktionsschemata (Flemisch et al., 2003). Es entsteht eine bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrer und Automation, die größtenteils haptisch über die Bedienelemente für die primäre Fahraufgabe stattfindet. Bei bevorstehender Gefahr wird der Fahrer haptisch gewarnt. In kritischen Situationen wird zusätzlich mit akustischen Signalen unterstützt.

Durch die Handlungen von Fahrer und Automation am Bedienelement kann der jeweils andere Partner die Absicht wahrnehmen, sein Vorhaben ändern oder seine

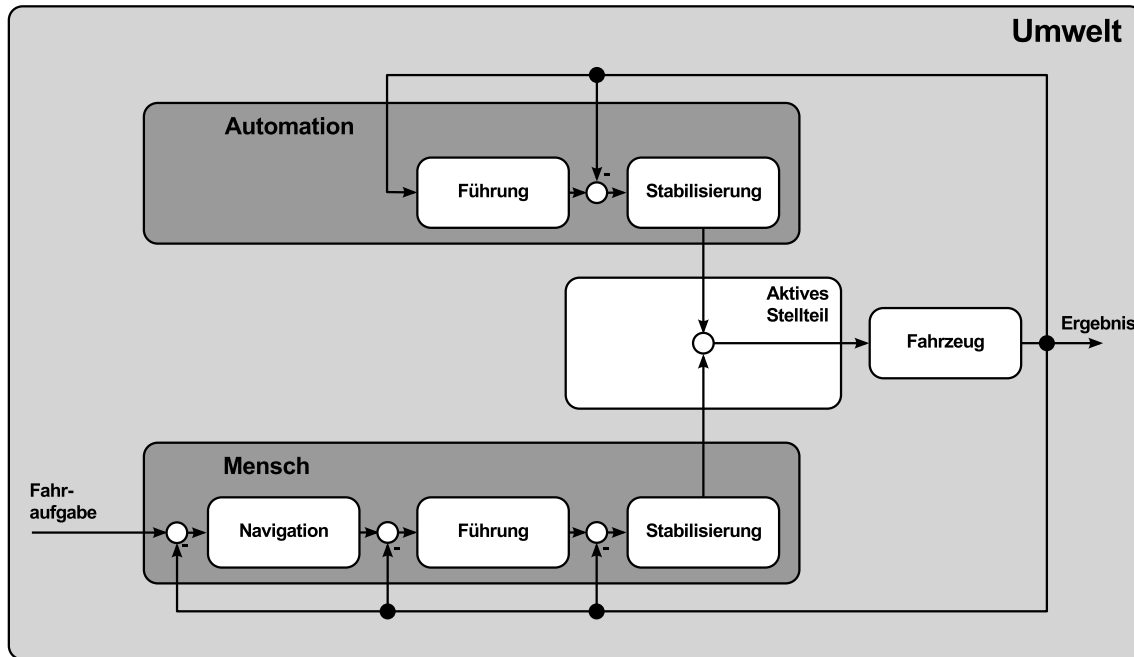


Abbildung 6.2: Fahrzeugführung nach dem H-Mode Prinzip

Strategie anpassen. Da beide Kooperationspartner gleichzeitig auf die Fahrzeugführung einwirken, handelt es sich bei H-Mode um eine simultan und parallel stattfindende kooperative Fahrzeugführung. Abbildung 6.2 zeigt den Informationsfluss des H-Mode Konzepts.

Die Informationsverarbeitung der Automation findet beim H-Mode Konzept in gleicher Weise wie die des Menschen statt. Die Automation nimmt die Umwelt über Sensoren wahr und generiert aus diesen Informationen Handlungsstrategien. Im Folgenden wird auf das Beispiel des Fahrstreifenwechsels zurückgegriffen, um das Prinzip von H-Mode näher zu erläutern. Zunächst folgt die Automation dem aktuell befahrenen Fahrstreifen. Dabei plant sie auf Führungsebene eine Trajektorie, der sie auf der Stabilisierungsebene durch Aufbringen von Kräften auf dem aktiven Stellteil folgt. Der Fahrer spürt über das Bedienelement zu jedem Zeitpunkt den Eingriff der Automation in die Fahrzeugführung. Möchte der Fahrer einen Fahrstreifenwechsel durchführen, so plant er eine entsprechende Trajektorie und versucht dieser durch Aufbringen einer Kraft auf das Stellteil zu folgen. Die Automation nimmt den Eingriff des Fahrers auf der Stabilisierungsebene wahr und versucht zunächst die entstehende Querablage durch Kräfte am Stellteil zu kompensieren. Durch die anhaltende Krafteinwirkung des Fahrers erkennt die Automation seinen Wunsch, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen und überprüft, ob dieser zum aktuellen Zeitpunkt durchführbar ist. Steht einem Wechsel nichts entgegen, so beginnt die Automation das Manöver zu unterstützen, indem sie auf der Führungsebene eine



entsprechende Trajektorie plant und diese auf Stabilisierungsebene durch Krafteinwirkung auf das Stellteil umsetzt.

Da das aktive Stellteil eine zentrale Stellung im Konzept von H-Mode einnimmt, findet die Interaktion zwischen Fahrer und Automation vorwiegend auf der Stabilisierungsebene statt.

Die Rolle des jeweiligen Kooperationspartners ist dabei jedoch nicht festgeschrieben. So kann sich die Aufgabe durch Transitionen im Automationsspektrum von Zeit zu Zeit ändern. Auf Wunsch kann der Fahrer z. B. durch Drücken eines Knopfs oder Betätigen eines Hebels eine Transition in einen niedrigeren Automationsgrad initiieren (vgl. Schieben, Temme, Köster & Flemisch, 2010). Die Automation zieht sich dadurch weitgehend aus der Fahraufgabe zurück, während der Fahrer die Fahrzeugführung übernimmt. Umgekehrt kann der Fahrer auch den Automationsgrad erhöhen und wird somit von der Fahraufgabe entlastet, während die Automation die Steuerung des Fahrzeugs wahrnimmt. In diesem Fall schlüpft der Fahrer in die Rolle des Überwachers.



7 Alternative Bedienkonzepte für die Fahrzeugführung

Wie in Kapitel 6 bereits angesprochen, nimmt der Informationsaustausch zwischen Mensch und Automation bei der kooperativen Fahrzeugführung eine zentrale Stellung ein. Dabei kann dieser Dialog über unterschiedliche Kanäle, z. B. visuell, akustisch oder haptisch modelliert werden. Aufgrund der parallelen Ausführung der Fahraufgabe von Mensch und Automation steht der haptische Kanal bei der kooperativen Fahrzeugführung im Zentrum. Der Austausch findet somit über ein aktives Stellteil, wie in Kapitel 3 beschrieben, statt.

Die Bedienung des Fahrzeugs über das konventionelle Bedienkonzept mit Lenkrad und Pedalen ist über Jahre hinweg entstanden. Ursprünglich durch konstruktionsbedingte Restriktionen geprägt, musste die Lösung rein mechanisch umsetzbar und die erforderlichen Kräfte durch den Benutzer aufzubringen sein. So entwickelte sich die Lenkung bereits als Handrad, während die Geschwindigkeit noch mit einem Hebel eingestellt werden konnte.

Heutzutage nimmt das konventionelle Bedienkonzept, mit dem die primäre Fahraufgabe durchgeführt wird, beim Automobil eine absolute Monopolstellung ein. Es existieren zwar andere Konzepte neben Lenkrad und Pedalerie, diese stellen allerdings Speziallösungen dar. Es handelt sich dabei um angepasste Fahrzeuge, die einem körperlich beeinträchtigten Besitzer die Fahrzeugführung ermöglichen.

Für die kooperative Fahrzeugführung sind jedoch die konventionellen Stellteile nur bedingt einsetzbar. Während ein aktives Lenkrad gut für die Kommunikation nutzbar ist, schränken die Pedale den Spielraum ein. Durch die Ausführung der Längsführung über zwei (oder mit Kupplung sogar drei) Pedale, kann eine umfassende Kommunikation mit der Automation nicht bewerkstelligt werden. Zwar existieren aktive Fahrpedale, die einen Druckpunkt erzeugen und bewegen können, allerdings bekommt der Fahrer in gewissen Situationen keine Rückmeldung über die geplante Handlung der Automation. Befindet sich beim Bremsen kein Fuß des Fahrers



auf dem Fahrpedal, so können Informationen, die die Automation über das aktive Pedal an den Fahrer weitergeben würde, auch nicht wahrgenommen werden. Umgekehrt bekommt der Fahrer haptisch nur begrenzte Information über den Verzögerungswunsch der Automation mitgeteilt. Der Druckpunkt des Fahrpedals liegt auf der Ruheposition unabhängig von dem Betrag des Verzögerungsvorhabens.

Somit erscheint ein Blick auf alternative Bedienkonzepte lohnenswert. In der geschichtlichen Entwicklung des Kraftfahrzeugs erscheinen immer wieder neuartige Konzepte. So stellt General Motors 1959 ein Fahrzeug mit Sidestick vor (Bidwell, 1959, zitiert nach Eckstein, 2001). Das rein mechanisch gelöste Konzept basiert auf dem in der Mittelkonsole montierten Bedienelement (s. Abbildung 7.1).



Abbildung 7.1: Unicontrol-Bedienelement von General Motors (entnommen aus Penka, 2001)

Lammel (1983, zitiert nach Bubb, 1985) stellt in seiner Designstudie einige neuartige Konzepte vor. So ähnelt das in Abbildung 7.2 links vorgestellte Bedienelement einem bei heutigen Spielen weitverbreiteten Joypad. Dabei kann durch Drehen der beiden mechanisch verbundenen Teller im Stellteil der Lenkwinkel verändert werden. Die Längsführung kann durch Ziehen und Drücken des gesamten Schlittens beeinflusst werden.

Ein weiteres Konzept ist in Abbildung 7.2 rechts zu sehen. Dabei wird durch Drehen des Bedienelements der Lenkwinkel verstellt. Beschleunigen und Verzögern erreicht der Fahrer durch Kippen der Griffe.

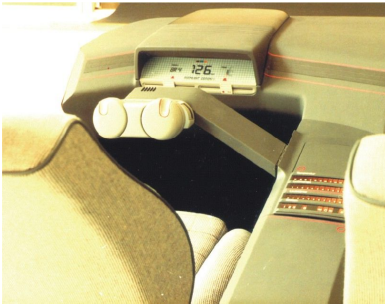


Abbildung 7.2: Designstudie mit alternativem Bedienelement (entnommen aus Penka, 2001)

Bolte (1991) experimentiert mit einem aktiven Sidestick zur Fahrzeugführung. Dieses zweiachsige Bedienelement vereint Längs- und Querführung in einem Stellteil.

Im selben Jahr präsentiert Saab das in Abbildung 7.3 dargestellte Stellteil (Bränneby, Palmgren, Isaksson, Petterson & Franzén, 1991, zitiert nach Eckstein, 2001). Dabei besteht das Konzept aus Pedalen und einem aktiven Handstellteil, das für den Einsatz von Kampfflugzeugen entwickelt wurde (Nordström, 1982).



Abbildung 7.3: Alternatives Bedienelement von Saab (entnommen aus Huang, 2004)

Während die dem konventionellen Fahrzeug entsprechenden Pedale der Längsführung dienen, wird das Lenken durch die Querbewegung des Handstellteils erreicht. Das grundlegende Verhalten wird durch mechanische Feder-Dämpfer-Elemente



vorgegeben, kann allerdings durch einen Aktuator mit einem zusätzlichen Moment beaufschlagt werden.

In dem Forschungsfahrzeug F 200 von Daimler (1996) erfolgt die Steuerung mit einem in der Mittelkonsole verbauten Sidestick (s. Abbildung 7.4).



Abbildung 7.4: Daimler F 200 (entnommen aus Motorstown, 2014)

Schilgen (1999) zeigt ein neuartiges Bedienelement, dessen virtuelle Drehachsen in der Mitte der Hand liegen, d. h. die Bewegung der Hand erfolgt in einer Kugelschale (s. Abbildung 7.5).



Abbildung 7.5: Center-Point-Sidestick (entnommen aus Winner & Heuss, 2005)

Durch Supination und Pronation des Unterarms kann das Fahrzeug gelenkt werden. Die Geschwindigkeitsregelung wird durch Ulnarabduktion bzw. Radialabduktion der Hand erreicht. Durch die fehlenden Hebelarme bietet dieser Center-Point-Sidestick

den Vorteil, dass Beschleunigungen, die auf die Hände wirken, nicht an das Fahrzeug übertragen werden.

TRW (1999) hält das Gebrauchsmuster „Lenkvorrichtung für ein Kraftfahrzeug“. Die Steuerung der Längsführung erfolgt dabei durch die konventionellen Pedale. Das Lenken hingegen wird durch Verschieben der miteinander gekoppelten Handgriffe, die in Abbildung 7.6 dargestellt sind, durch den Fahrer eingeleitet. Der Vorteil dieses Konzepts besteht in der festen Verbindung von Lenkrad und Fahrzeugkarosserie. Signale, die vom Lenkrad gesendet werden, müssen somit nicht mehr aufwendig durch Schleifkontakte oder Wickelfedern übertragen werden.



Abbildung 7.6: Alternatives Bedienelement der Firma TRW (entnommen aus Huang, 2004)

Das 2001 von Bertone und SKF vorgestellte Konzept vereint die Längs- und Querführung des Fahrzeugs in einem Bedienelement (Bertone & SKF, 2001, zitiert nach Huang, 2004). Dabei kann durch das Bewegen zweier miteinander gekoppelter Griffe die Lenkung des Fahrzeugs beeinflusst werden (vgl. Abbildung 7.7). Durch Drehen des Griffs, wie bei einem Motorrad, kann das Fahrzeug beschleunigt werden. Das Verzögern kann durch Quetschen der Griffe bewerkstelligt werden.



Abbildung 7.7: Filo-Bedienelement für die Längs- und Querführung eines Kraftfahrzeugs (entnommen aus Huang, 2004)



Da es sich bei der Fahrzeugführung um eine zweidimensionale Fahraufgabe handelt, sollte, aus ergonomischen Überlegungen heraus, auch das Bedienkonzept lediglich zwei Dimensionen aufweisen. Aus diesem Grund und der bereits erwähnten Problematik des eingeschränkten Informationsaustauschs der Pedal-Konzepte, können die vorgestellten Prototypen mit Fußstellteilen als Grundlage für ein Bedienkonzept der kooperativen Fahrzeugführung ausgeschlossen werden. Auch das Konzept von TRW ist für die Interaktion von Fahrer und Automation unbrauchbar, da durch die starre Verbindung des Stellteils mit der Karosserie haptisch keine Informationen ausgetauscht werden können.

Im Rahmen des Projekts H-Mode wurden eine Reihe weiterer Konzepte auf der Basis aktiver Stellteile auf ihre Nutzbarkeit für die Fahrzeugführung überprüft. So wurden zahlreiche Versuche mit aktiven Sidesticks durchgeführt, von denen einige Ergebnisse im Folgenden kurz dargestellt werden.

Kienle, Damböck, Kelsch, Flemisch und Bengler (2009) stellen fest, dass ein isomorpher Sidestick bei manueller Fahrt zu einer signifikanten Verschlechterung der Querführung führt. Darüber hinaus können die Aussagen über instabiles Verhalten bei Rückmeldung der Giergeschwindigkeit nachgewiesen werden (vgl. Eckstein, 2001). Bei diesem Konzept verschlechtert sich zudem die Querführung signifikant. Die häufig geäußerten Bedenken der Versuchspersonen, dass die Beschleunigungskräfte im Fahrzeug die Querführung bei Sidestick-Konzepten verschlechtere, haben sich im Versuch jedoch nicht bestätigt (vgl. Kienle, Damböck, Bubb & Bengler, 2013). So kann kein Einfluss von Schwingung oder Beschleunigung auf die Fahrzeugführung nachgewiesen werden.

Wiedemann (2010) untersucht das Fahren mit unterschiedlichen Fingersticks im statischen Fahrsimulator. Alemdar (2009) zeigt, dass mit Fingersticks eine vergleichbare Querführung erreicht werden kann wie mit Sidestick-gebundenen Konzepten. Subjektiv werden die Fingersticks allerdings schlechter bewertet als das Konzept mit Sidestick.

In den subjektiven Bewertungen durchgeführter Versuche kann häufig die Vorliebe zu lenkradbasierten Bedienkonzepten festgestellt werden. Besonders fahrerfahrene Probanden schätzen das Lenkrad aufgrund der zahlreichen Greifmöglichkeiten. Darüber hinaus kritisieren sie vielfach die Umsetzbarkeit der grundlegend neuartigen Konzepte. So stellen sie heraus, dass die Fahrzeugführung nicht kurzfristig von Lenkrad auf Sidestick umgestellt werden könne.

Aus diesen Gründen werden in dieser Arbeit neuartige Bedienkonzepte entwickelt, die sich an das konventionelle Konzept der Fahrzeugführung anlehnen. Sie verei-



nen die Längs- und Querführung des Kraftfahrzeugs in einem Bedienelement und könnten als Migrationsszenario auf dem Weg zur kooperativen Fahrzeugführung dienen.



8 Versuchseinrichtung und Metriken

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den in den Versuchsreihen verwendeten Simulator gegeben. Abhängig vom Untersuchungsgegenstand wird das System in den Kapiteln 9 und 10 an den jeweiligen Versuch angepasst. Die Änderungen werden in der entsprechenden Versuchsbeschreibung ausgeführt.

Darüber hinaus wird auf die objektiven und subjektiven Mess- und Kennwerte eingegangen, die in den Versuchsreihen zur Bewertung der Bedienkonzepte herangezogen werden.

8.1 Der Fahr Simulator

Alternative Bedienkonzepte für die Fahrzeugführung in einem Versuchsträger zu untersuchen, stellt einen hohen technischen Anspruch an die verwendete Hardware. So muss die Steuerelektronik der Stellteile eine hohe Zuverlässigkeit bieten und störungsunempfindlich sein. Es müssen alle benötigten Schnittstellen, wie z. B. CAN-Bus-Protokolle bekannt sein, um für das Konzept benötigte Daten für die weitere Verarbeitung vom Fahrzeugbus zu erhalten. Darüber hinaus ist eine genaue Kenntnis über das Verhalten des Fahrzeugs nötig, um erforderliche Regler entwickeln und an die Regelstrecke anpassen zu können. Selbst nach dieser Parametrierung ist es häufig noch notwendig, eine Feinjustierung im Realversuch vorzunehmen. Dabei kann es zu kritischen Situationen kommen, die auf öffentlichen Straßen andere Teilnehmer gefährden würden. Aus diesem Grund sind für die Zulassung eines Versuchsträgers zahlreiche Hürden zu überwinden. Um erste Versuche jedoch einfach umsetzen zu können, werden diese daher meist auf einem speziellen Versuchsgelände durchgeführt, das für die Öffentlichkeit unzugänglich ist.

Sehr häufig wird auch auf eine noch einfachere Lösung, die zudem weitaus mehr Möglichkeiten bietet, zurückgegriffen. So gestattet die Umsetzung in einem Fahr Simulator eine einfache Einbindung neuer Hardware und Technologien, da alle Daten im Speicher abgelegt und durch Programmierschnittstellen zugänglich sind.



Einen weiteren Vorteil stellt die Reproduzierbarkeit situationsbezogener Untersuchungen dar. Das Verhalten aller Verkehrsteilnehmer kann während der Simulationslaufzeit verändert werden. So kann z. B. ein Verzögerungsvorgang des vorausfahrenden Fahrzeugs bei Passieren eines festgelegten Streckenmeters oder bei der Überschreitung einer vorgegebenen Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs eingeleitet werden. Somit ist sichergestellt, dass die zu untersuchende Situation für alle Versuchspersonen identisch ist.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen werden im Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt. Es handelt sich um einen einfachen Aufbau in Form einer Sitzkiste, die aus einem Profilsystem besteht. Wie in Abbildung 8.1 erkennbar ist, ermöglicht seine modulare Konstruktion eine einfache Anpassung an die in den Versuchen benötigten Stellteile.



Abbildung 8.1: Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie

Die Repräsentation der Frontsicht wird durch einen LCD-Fernseher mit einer Diagonalen von 55 Zoll erreicht. Dieser befindet sich, abhängig von der Größe des Probanden und der damit verbundenen Sitzverstellung in einem Abstand von 1 bis 1,3 m zum Augpunkt und bietet der Versuchsperson bei einer Auflösung von 1920×1080 Bildpunkten einen Blickwinkel von bis zu 62° . Die Simulationssoftware SILAB des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) verwaltet alle Objekte der virtuellen Umgebung und erzeugt die Projektionen der Sichtkanäle. Darüber hinaus generiert die Software das Straßennetz entsprechend den geltenden Bauvorschriften. Die verwendete Fahrdynamik des Ego-Fahrzeugs mit Vier-Gang-Automatikgetriebe stammt von Müller Systemtechnik und wird als Erweiterungsmodul für SILAB angeboten. Das grundlegende Verhalten des Fremdverkehrs kann in einer speziellen Beschreibungssprache frei definiert werden und wird ebenfalls durch SILAB berechnet. Weiterhin kann die Aufzeichnung aller relevanten objektiven Messgrößen bewerkstelligt werden. Tabelle 8.1 zeigt einen Auszug der in den Versuchen aufgezeichneten Daten.



Tabelle 8.1: Auszug objektiver Fahrdaten

OBJEKTIVE DATEN	EINHEIT
Koordinaten x / y / z	m
Orientierung yaw / pitch / roll	rad
Geschwindigkeit	m/s
Beschleunigung x / y / z	m/s ²
Lenkradwinkel	rad
Fahrpedal	-
Bremspedal	-
Fahrstrecke	m
Fahrstreifenindex	-
Querablage	m
Modul ID	-
Node ID	-
Abstand vorausfahrendes Fahrzeug	m
Geschwindigkeit vorausfahrendes Fahrzeug	m/s

8.2 Kennwerte zur Evaluierung der Bedienkonzepte

Im Folgenden werden sowohl subjektive als auch objektive Kennwerte zur Evaluierung der Bedienkonzepte vorgestellt. Dabei werden die objektiven Kennwerte aus den aufgezeichneten Messgrößen ermittelt und in den beiden Dimensionen Längs- und Querführung getrennt betrachtet.

8.2.1 Objektive Kennwerte

8.2.1.1 Bewertung der Längsführung

Um aussagekräftige Kennwerte für die Bewertung der Längsführungsregelqualität zu finden, muss zunächst die Aufgabe identifiziert werden. Dabei kann die Längsführung eines Kraftfahrzeugs nicht als eine unabänderliche Aufgabe verstanden werden. So stellen sich dem Fahrer situationsabhängig unterschiedlichste Aufgaben der Längsführung (vgl. Bubb, 1985). Während der Fahrer bei einer Folgefahrt den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug regelt, versucht er bei freier Fahrt eine bestimmte Geschwindigkeit zu halten. Dabei kann diese Geschwindigkeitsvorgabe durch die Straßenverkehrsordnung oder durch eine persönliche Vorliebe entstehen.



In den Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit werden jedoch ausschließlich unterschiedliche Geschwindigkeiten vorgegeben, die der Fahrer einhalten soll. So wird im Folgenden der Kennwert für die Bewertung der Geschwindigkeitshaltung vorgestellt. Als Grundlage dient die allgemeine Gleichung für Qualität nach Schmidtke (1993), die Werte zwischen null und eins annehmen kann.

$$Q = \frac{\text{Aufgabenerfüllung}}{\text{Aufgabenstellung}} \quad (8.1)$$

Dabei stellt die vorgegebene Zielgeschwindigkeit v_{Ziel} des Versuchs die Aufgabenstellung dar und die gefahrene Geschwindigkeit v entspricht der Aufgabenerfüllung. Um eine Qualität größer als eins zu verhindern, wird die Formel zusätzlich geringfügig angepasst. Da eine Geschwindigkeitsübertretung um 20 km/h quantitativ gesehen gleichbedeutend einer Unterschreitung von 20 km/h ist, lässt sich für die Berechnung der Geschwindigkeitshaltung die zusammengesetzte Gleichung 8.2 definieren.

$$Q = \begin{cases} \frac{v}{v_{Ziel}} & v < v_{Ziel} \\ \frac{2v_{Ziel} - v}{v_{Ziel}} & v_{Ziel} \leq v \leq 2v_{Ziel} \\ 0 & v > 2v_{Ziel} \end{cases} \quad (8.2)$$

8.2.1.2 Bewertung der Längsführung in einem kritischen Szenario

In einer Folgefahrt muss der Fahrer den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch Eingriffe in die Längsführung regeln. Verzögert das Vorderfahrzeug unerwartet, so muss der Fahrer auch seine Geschwindigkeit reduzieren. Dabei kann es zu kritischen Situationen kommen, die durch Verzögerungen größer als 5 m/s^2 oder entstehende TTC^1 kleiner als 1,5 s identifiziert werden können (Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser & Steinle, 2008).

So wird zur Bewertung der Längsführung neben der maximalen Verzögerung auch die minimale TTC innerhalb kritischer Szenarien herangezogen, deren Berechnung nach Gleichung 8.3 erfolgt. Dabei ist die TTC vom Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug d_{ahead} sowie der Differenzgeschwindigkeit abhängig.

$$TTC = \frac{d_{ahead}}{v - v_{ahead}} \quad (8.3)$$

¹Time-to-Collision



8.2.1.3 Bewertung der Querführung

Die Aufgabe der Querführung wird primär durch die Straßenführung bestimmt. Jedoch kann diese durch äußere Umstände beeinflusst werden. So zwingt z. B. ein parkendes Auto am Straßenrand den Fahrer dazu, seine Trajektorie um das Hindernis herum zu planen.

In den vorliegenden Versuchsreihen treten jedoch keine Sonderfälle ein, sodass sich auf Basis der lateralen Querablage zur Fahrstreifenmitte ein Maß für die Qualität der Fahrzeugführung ermitteln lässt.

Neben einer Bewertung durch Mittelwert und Standardabweichung der Querablage führt Reichart (2000) ein neues Maß unter dem Begriff der Seitenführungsqualität ein. Der Vorteil dieses Kennwertes liegt zum einen in seiner normierten Form, die zusätzlich die Breite des Fahrstreifens b_{FS} sowie des Fahrzeugs b_{FZG} beachtet und zum anderen im Fehlen einer Einheit. Die Bewertung der Querführung findet auf der Basis der Seitenführungsqualität statt, die sich aus der Querablage y des Fahrzeugmittelpunkts nach Gleichung 8.4 berechnen lässt.

$$Q = \begin{cases} 1 - \left| \frac{2y}{b_{FS} - b_{FZG}} \right| & |y| \leq \frac{1}{2}(b_{FS} - b_{FZG}) \\ 0 & |y| > \frac{1}{2}(b_{FS} - b_{FZG}) \end{cases} \quad (8.4)$$

Der Subtrahend $|2y/(b_{FS} - b_{FZG})|$ charakterisiert hierbei den Ausnutzungsgrad des seitlichen Bewegungsspielraums.

8.2.1.4 Bewertung der Übernahmequalität bei einer Automationsfehlfunktion

Im Fall einer Fehlfunktion der Automation muss der Fahrer die Fahrzeugführung übernehmen. Da er nicht auf das fehlerhafte Verhalten hingewiesen wird, beginnt das Fahrzeug ohne den Eingriff des Fahrers vom Fahrstreifen abzudriften. Somit kann zur Bewertung der Querführung bei einer erzwungenen Übernahme die Seitenführungsqualität nach Reichart (2000) herangezogen werden. Auch die Zeit von der Fehlfunktion bis zum ersten Eingriff und die maximale Querablage zur Fahrstreifenmitte stellen Kennwerte dar, die Aufschluss über die Qualität geben.

Da der Fahrer im ungünstigsten Fall sogar den eigenen Fahrstreifen verlässt, stellt auch die Tatsache, ob das Fahrzeug die Fahrstreifenmarkierung überschreitet ein Qualitätsmerkmal dar. Definitionsgemäß handelt es sich um ein Überfahren, wenn eine Deckung der Spur und des Fahrstreifenrandes auftritt (vgl. Abbildung 8.2).



Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht zwingend ein Eingriff des Fahrers stattfindet, kann das Fahrzeug eine beträchtliche Strecke außerhalb des Fahrstreifens zurücklegen, bevor der Fahrer auf den Fahrstreifen zurücklenkt. Somit stellt auch das Verhältnis der außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Streckenmeter x zur betrachteten Gesamtstrecke s während der Fehlfunktion einen Kennwert dar (s. Abbildung 8.2).

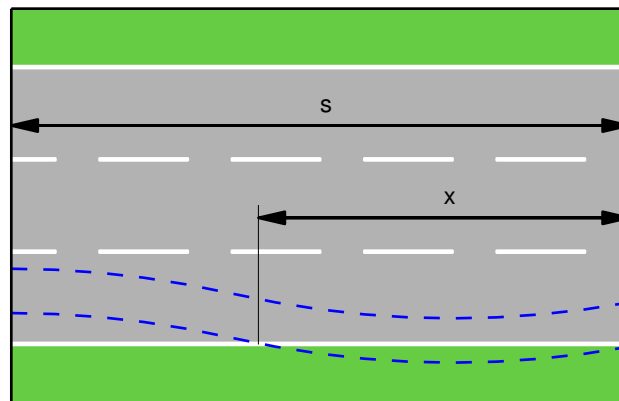


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung des Verhältnisses der außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Streckenmeter zur betrachteten Gesamtstrecke (Spur des Fahrzeugs: blau/gestrichelt)

8.2.2 Subjektive Kennwerte

8.2.2.1 Bewertung der Fahrerbeanspruchung

Zur Messung der subjektiven Beanspruchung wird der ungewichtete NASA-TLX² Fragebogen herangezogen (vgl. Hart & Staveland, 1988, übersetzt nach Seifert, 2002). Dieser besteht aus den sechs Kategorien *geistige Anforderungen*, *körperliche Anforderungen*, *zeitliche Anforderungen*, *Ausführung der Aufgabe*, *Anstrengung* und *Frustration*. Durch eine Markierung können die Versuchspersonen ihre subjektive Einschätzung zu jeder Kategorie auf einer Skala zwischen den beiden Extrema *gering* und *hoch* zum Ausdruck bringen. Im Anschluss kann der Overall Workload Index berechnet werden, der die Beanspruchung des Probanden zwischen 0 und 100 widerspiegelt. Dabei bedeutet ein niedriger Wert eine geringe und ein großer Overall Workload Index eine hohe Beanspruchung. Der Fragebogen ist in Kapitel A.2 einsehbar.

²Task Load Index



8.2.2.2 Bewertung der Usability

Die subjektive Bewertung der Usability wird durch den PSSUQ³-Fragebogen erhoben (vgl. Lewis, 2002). Dieser besteht aus einer Reihe von Aussagen über das erlebte technische System, das die Versuchspersonen auf einer siebenstufigen Likert-artigen Skala differenziert bewerten können. Dabei geben die Versuchspersonen durch Ankreuzen den Grad ihrer Zustimmung ab, wobei 1 einer Zustimmung und 7 einer Ablehnung der Aussage gleichkommt. Da einige Aussagen des PSSUQ-Fragebogens für die durchgeführte Untersuchung nicht beantwortbar sind, wurden diese entfernt. Es entstand ein angepasster Fragebogen mit 15 Aussagen, der in Kapitel A.3 zu finden ist.

8.2.2.3 Bewertung der subjektiven Wahrnehmung der Automation

Zur Bewertung der subjektiven Wahrnehmung der Interaktion zwischen Automation und Fahrer sowie zur Usability wurde ein Fragebogen entworfen. Er wurde durch ein iteratives Vorgehen basierend auf Verbesserungsvorschlägen von Experten entwickelt und besteht aus acht Aussagen mit zugehöriger siebenstufiger Likert-artiger Skala. Durch Ankreuzen geben die Versuchspersonen zu jeder Aussage den Grad ihrer Zustimmung bekannt und können zusätzlich Anmerkungen frei verbalisieren. Der Fragebogen ist in Kapitel B.1 einsehbar.

8.2.2.4 Bewertung der subjektiven Wahrnehmung der Automationsfehlfunktion

Die Bewertung der subjektiven Wahrnehmung der Automationsfehlfunktion wird durch einen speziellen Fragebogen erhoben. Dieser wurde ebenfalls durch zahlreiche Verbesserungsvorschläge von Experten iterativ entwickelt. Die Probanden haben darin die Möglichkeit, die Bedienkonzepte im direkten Vergleich zu bewerten. Durch Ankreuzen der siebenstufigen Likert-artigen Skala können die Versuchspersonen den vier Aussagen differenziert zustimmen oder sie ablehnen. Unter Kapitel B.2 ist der Fragebogen abgebildet.

³Post Study System Usability Questionnaire



9 Versuch zur manuellen Fahrzeugführung

In diesem Kapitel wird eine Versuchsreihe vorgestellt, die der Frage nach einem geeigneten Bedienkonzept als Basis für die kooperative Fahrzeugführung nachgeht. Da das Fahrzeug auch bei Ausfall der Automation für den Fahrer beherrschbar bleiben muss, werden dem konventionellen Konzept in dieser ersten Versuchsreihe zunächst drei alternative Bedienkonzepte zur manuellen Fahrt gegenübergestellt. Dabei wird der Einfluss der verschiedenen Stellteile auf die Regelqualität der Längs- und Querführung erforscht, sowie die Wirkung auf die Beanspruchung des Fahrers und seine Bewertung bezüglich der Usability überprüft.

Zunächst wird auf die Methodik (Kapitel 9.1) eingegangen, da ein Wissen über die darin enthaltenen Bedienkonzepte die Voraussetzung für die in Kapitel 9.2 vorgestellten Hypothesen ist. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse (Kapitel 9.3) vorgestellt und die Hypothesen diskutiert (Kapitel 9.4).

9.1 Methodik

9.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuch findet im vorgestellten Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München statt. Dazu wurden die im Folgenden beschriebenen Bedienkonzepte entwickelt und die erforderlichen Stellteile in den Simulator integriert.

9.1.1.1 Bedienkonzepte

Konventionelles Bedienkonzept

Das konventionelle Bedienkonzept bildet die Vergleichsbasis dieser Versuchsreihe und setzt sich aus den heute gängigen Stellteilen, bestehend aus Lenkrad und



Pedalerie zusammen. Da es sich in der Simulation um ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe handelt, werden nur das Brems- sowie Fahrpedal im Simulator eingesetzt. Die Lenkdynamik des Fahrzeugs wird durch das Steuergerät des Aktuators mithilfe des sogenannten Impedanzmodus nachgebildet. Durch die Parametrierung von Federsteifigkeit, Dämpfung und Reibung kann das Verhalten eines beliebigen Fahrzeugs angenähert und das Rückstellmoment geschwindigkeitsabhängig angepasst werden. Abbildung 9.1 zeigt die genutzte Lenkcharakteristik, die durch subjektive Bewertungen in Vorversuchen optimiert wurde.

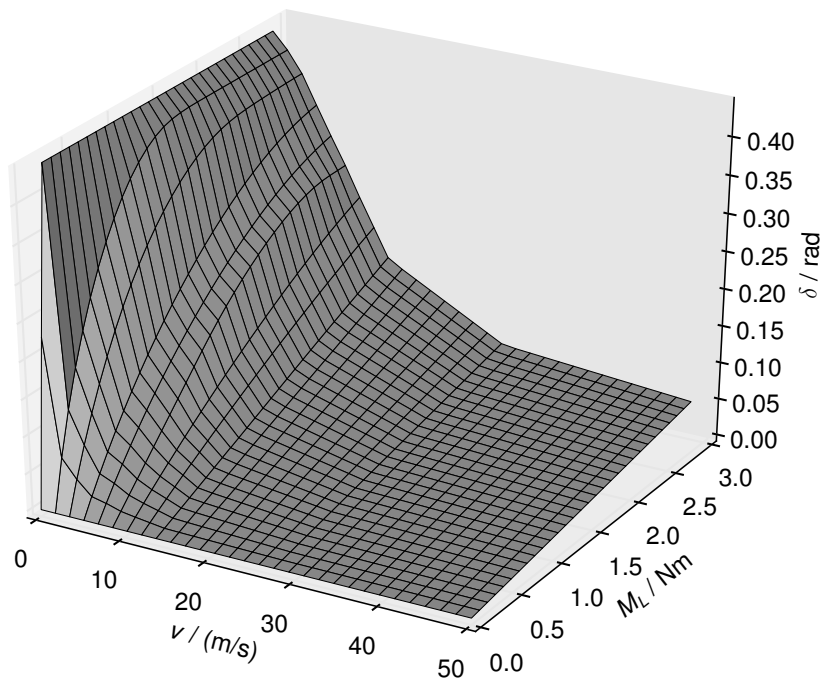


Abbildung 9.1: Abhängigkeit des Lenkwinkels δ von dem auf das Lenkrad aufgetragenen Moment M_L und der Fahrzeuggeschwindigkeit v

Als Fahrpedal wird ein aktives Pedal der Firma Continental verwendet, das einen linearen Kraftverlauf über den Auslenkwinkel bis zum Endanschlag bei 40 N zeigt (vgl. Gleichung 9.1). Der Winkel α_{FP} wird mit einer Frequenz von 300 Hz abgetastet, auf den maximalen Ausschlag normiert und an die Simulation übertragen.

$$\alpha_{FP}(F_{FP}) = \begin{cases} 0 & F_{FP} < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{40} (F_{FP}/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_{FP} \leq 40 \text{ N} \\ 1 & F_{FP} > 40 \text{ N} \end{cases} \quad (9.1)$$

Bei dem verwendeten Bremspedal handelt es sich um eine Eigenentwicklung, dessen Rückstellmoment vereinfachend durch einen Parabelgummipuffer bestimmt wird.



Der Arbeitsbereich beschränkt sich auf den Maximalwert von 300 N, in dem der Winkel α_{BP} noch als lineare Funktion zur Kraft angenähert werden kann (vgl. Gleichung 9.2).

$$\alpha_{BP}(F_{BP}) = \begin{cases} 0 & F_{BP} < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{300} (F_{BP}/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_{BP} \leq 300 \text{ N} \\ 1 & F_{BP} > 300 \text{ N} \end{cases} \quad (9.2)$$

Yoke

Bei diesem Stellteil handelt es sich um ein im Bereich der Luftfahrt bekanntes Bedienelement. Dieses Steuerhorn der Firma Wittenstein (s. Abbildung 9.2) besitzt, wie ein Lenkrad, eine Rotationsachse, kann aber zusätzlich translatorisch bewegt werden. Für die Versuche wurde der Griff entfernt und durch einen konventionellen Lenkradkranz ersetzt. Während die Querführung dem konventionellen Konzept entspricht, kann auf die Längsführung des Fahrzeugs durch Ziehen und Drücken entlang der Achse Einfluss genommen werden.



Abbildung 9.2: Rotatorisch-translatorisches, aktives Stellteil der Firma Wittenstein (entnommen aus Wittenstein, 2002)

Durch Drücken kann dabei beschleunigt und durch Ziehen verzögert werden. Die aufgebrachte Kraft wird durch eine lineare Abbildung in eine virtuelle Fahr- und Bremspedalstellung transformiert und an die Simulation übermittelt. Abbildung 9.3 zeigt den virtuellen Fahrpedalwinkel α_{FP} bzw. Bremspedalwinkel α_{BP} in Abhängigkeit der Handkraft.

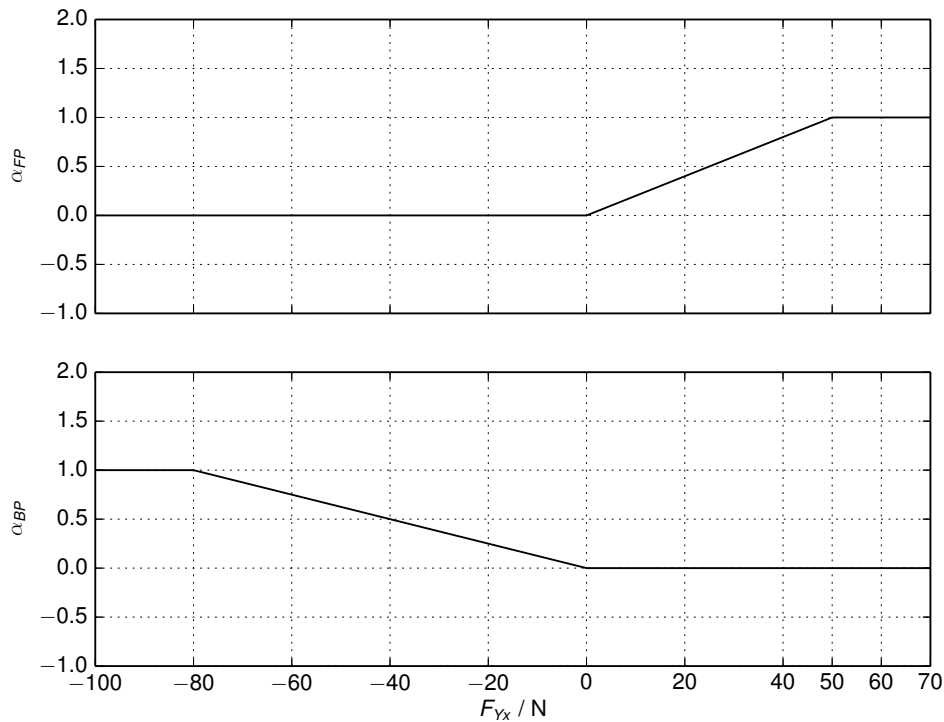


Abbildung 9.3: Virtuelle Fahrpedalstellung α_{FP} und Bremspedalstellung α_{BP} in Abhängigkeit der auf das Yoke aufgebrachten Kraft F_{Yx}

Die Berechnung der normierten, virtuellen Pedalstellungen erfolgt nach den Gleichungen 9.3 und 9.4.

$$\alpha_{FP}(F_{Yx}) = \begin{cases} 0 & F_{Yx} < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{50} (F_{Yx}/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_{Yx} \leq 50 \text{ N} \\ 1 & F_{Yx} > 50 \text{ N} \end{cases} \quad (9.3)$$

$$\alpha_{BP}(F_{Yx}) = \begin{cases} 1 & F_{Yx} < -80 \text{ N} \\ -\frac{1}{80} (F_{Yx}/\text{N}) & -80 \text{ N} \leq F_{Yx} \leq 0 \text{ N} \\ 0 & F_{Yx} > 0 \text{ N} \end{cases} \quad (9.4)$$

Bei diesem Konzept wird die Geschwindigkeit über die Längsposition des Lenkradkranzes zurückgemeldet. Als Anhaltspunkt für den Bewegungsraum des Stellteils dienen die Komfortwinkel des Ellenbogens aus der Literatur (vgl. Griffin, Lewin & Louviere, 1978, zitiert nach Krist, 1994; DIN, 1987). Um die Flexion des Ellenbogengelenks im Bereich von $122^\circ \pm 24^\circ$ (vgl. Krist, 1994) zu halten, ist der Bewegungsraum des Bedienelements auf 6,5 cm eingeschränkt und darauf der Geschwindigkeitsbereich des Fahrzeugs von 0 km/h bis 140 km/h linear abgebildet.



Yoke/Paddle

Dieses Konzept ähnelt der zuvor beschriebenen Yoke-Variante. Während die Rückmeldung der dynamischen Größen identisch ist, wird die Steuereingabe der Längsführung anders implementiert. So kann der Fahrer die Beschleunigung bzw. die Verzögerung des Fahrzeugs nicht durch Drücken bzw. Ziehen des Lenkrads, sondern durch Aufbringen einer Handkraft auf das rechte Paddle erreichen. Es handelt sich um ein isometrisches Paddle, das speziell für diesen Versuch umgebaut und mit Kraftsensoren versehen wurde (vgl. Abbildung 9.4). Während durch Drücken des Paddles mit dem Daumen beschleunigt wird, kann das Fahrzeug durch Ziehen mit Zeige-, Mittel- und Ringfinger verzögert werden.



Abbildung 9.4: Lenkrad mit Paddles

Die virtuelle Fahrpedalstellung α_{FP} und Bremspedalstellung α_{BP} in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft F_P ist in Abbildung 9.5 dargestellt und errechnet sich nach Gleichung 9.5 bzw. 9.6.

$$\alpha_{FP}(F_P) = \begin{cases} 0 & F_P < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{6} (F_P/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_P \leq 6 \text{ N} \\ 1 & F_P > 6 \text{ N} \end{cases} \quad (9.5)$$

$$\alpha_{BP}(F_P) = \begin{cases} 1 & F_P < -10 \text{ N} \\ -\frac{1}{10} (F_P/\text{N}) & -10 \text{ N} \leq F_P \leq 0 \text{ N} \\ 0 & F_P > 0 \text{ N} \end{cases} \quad (9.6)$$

Der Bewegungsraum von 6,5 cm entspricht dem Yoke-Konzept.

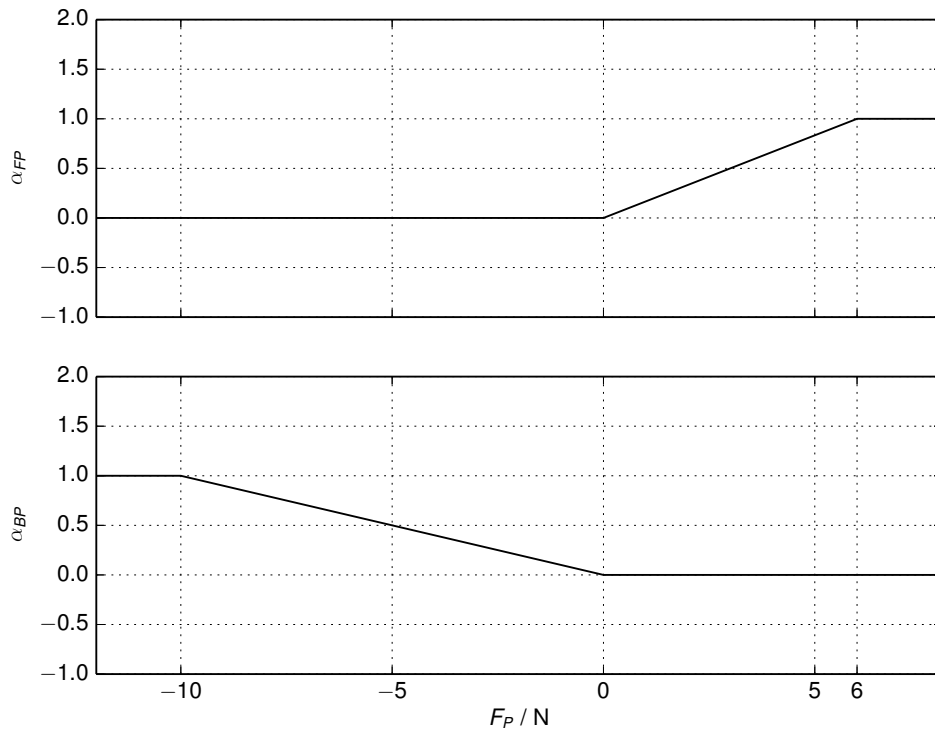


Abbildung 9.5: Abhängigkeit der Fahrpedalstellung α_{FP} und Bremspedalstellung α_{BP} von der, auf das Paddle aufgebrachten Kraft F_P

Sidestick

Dieses Konzept verwendet den in Abbildung 9.6 dargestellten zweiachsigen, aktiven Sidestick von Stirling Dynamics. Der Bewegungsbereich, dessen Abstand zwischen Dreh- und Angriffspunkt der Handkraft bei 192,9 mm liegt, umfasst in Längs- und Querrichtung $\pm 25^\circ$.



Abbildung 9.6: Zweiachsiges, aktives Stellteil von Stirling Dynamics (entnommen aus Science City, 2013)



Die Regelung des Aktuators wird von einem Steuergerät übernommen, das eine Grundfunktionalität, wie z. B. das Kalibrieren oder das Einstellen von Kennlinien bereitstellt. Über ein Netzwerkprotokoll kann der integrierte Server Steuerbefehle entgegennehmen. Bei einer Spannungsversorgung von 28 V ermöglichen die Aktuatoren eine maximale Kraft von ± 150 N pro Achse. Da der Sidestick als Force-Feedback-Bedienelement entwickelt wurde, wird die Wegrückführung durch den Einsatz sogenannter Softstops umgesetzt. Diese elektronisch simulierten Anschläge dienen üblicherweise der Schonung der mechanischen Wegbegrenzungen. Für diese Versuchsreihe werden jedoch die beiden Softstops beider Achsen auf die maximale Flankensteilheit von 100 N/° eingestellt und an die gewünschte Position gefahren. Die hohe Berechnungsfrequenz der Softstop-Regelalgorithmen in Kombination mit den steilen Flanken erzeugt bereits bei kleinen Abweichungen der Stickposition ein hohes Moment des Motors. Dadurch wird ein Servobetrieb nachgeahmt, dessen Sollposition durch gleichmäßiges Bewegen der beiden Softstops gestellt werden kann.

Durch die aufgebrachte Kraft in Querrichtung kann der Lenkwinkel des Fahrzeugs manipuliert werden. Um eine bessere Vergleichsbasis der Konzepte zu erhalten, wird bei der Sidestick-Variante wie auch bei den lenkradbasierten Konzepten der Lenkwinkel an den Fahrer zurückgemeldet.

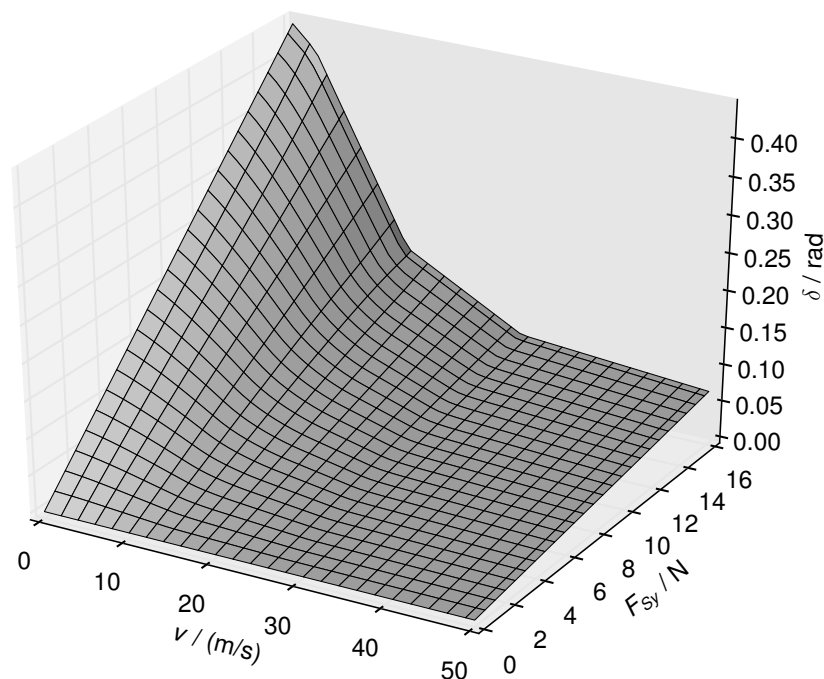


Abbildung 9.7: Abhängigkeit des Lenkwinkels δ von der auf den Sidestick aufgebrachten Handkraft F_{Sy} und der Fahrzeuggeschwindigkeit v



Das Verhältnis zwischen Handkraft und Lenkwinkel ist bei diesem Konzept ebenfalls geschwindigkeitsabhängig. Abbildung 9.7 gibt einen Überblick über den resultierenden Lenkwinkel δ in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Handkraft F_{Sy} .

Die Manipulation der Geschwindigkeit wird durch Aufbringen einer Kraft in Längsrichtung erreicht. Im Gegensatz zu einigen vorangegangenen Arbeiten am Lehrstuhl für Ergonomie wird die Handkraft nicht als Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsvorgabe interpretiert (vgl. Bolte, 1991; Eckstein, 2001), sondern in eine Pedalstellung umgerechnet (vgl. Penka, 2001). Dabei werden Kräfte in positiver Richtung als Fahrpedal- und negative Kräfte als Bremspedalstellung gedeutet. Der Vorteil dieser Auslegung liegt in der einfacheren Implementierung, da der Längsdynamikregler entfällt. Darüber hinaus profitiert die Vergleichbarkeit zum konventionellen Bedienkonzept, das ebenfalls ohne Längsregelung auskommt. Die Beziehung zwischen der Handkraft F_{Sx} und den Pedalwinkeln α_{FP} und α_{BP} ist in Abbildung 9.8 dargestellt und berechnet sich nach den Gleichungen 9.7 und 9.8.

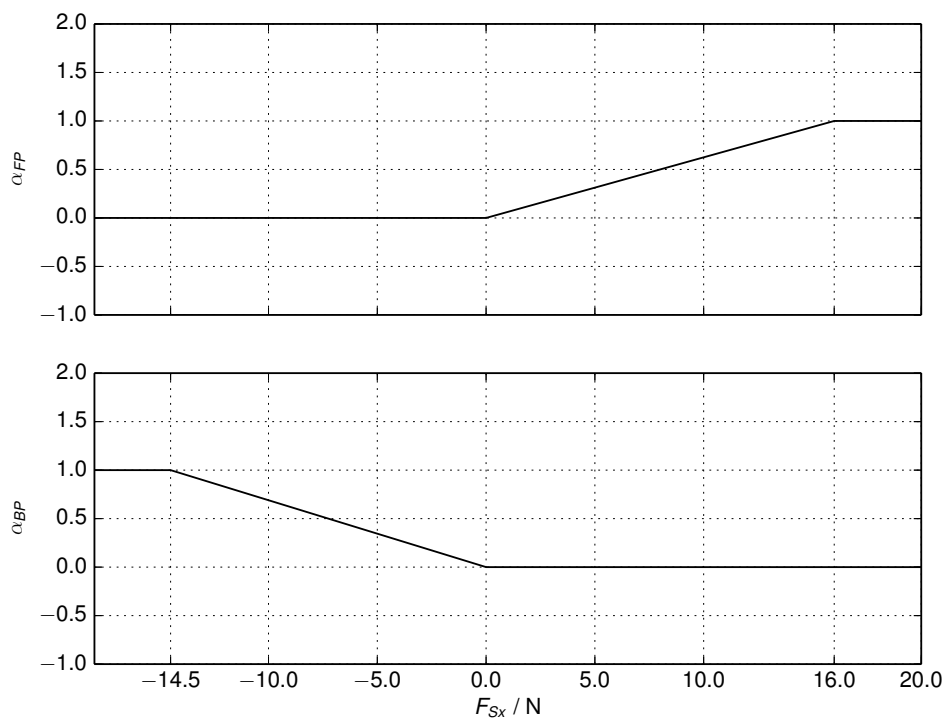


Abbildung 9.8: Abhängigkeit der Fahrpedalstellung α_{FP} und Bremspedalstellung α_{BP} von der, auf den Sidestick aufgebrauchten Handkraft F_{Sx}



$$\alpha_{FP}(F_{Sx}) = \begin{cases} 0 & F_{Sx} < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{16} (F_{Sx}/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_{Sx} \leq 16 \text{ N} \\ 1 & F_{Sx} > 16 \text{ N} \end{cases} \quad (9.7)$$

$$\alpha_{BP}(F_{Sx}) = \begin{cases} 1 & F_{Sx} < -14,5 \text{ N} \\ -\frac{1}{14,5} (F_{Sx}/\text{N}) & -14,5 \text{ N} \leq F_{Sx} \leq 0 \text{ N} \\ 0 & F_{Sx} > 0 \text{ N} \end{cases} \quad (9.8)$$

Bezüglich der Rückmeldegröße stellt Eckstein (2001) zwar fest, dass durch das träge Verhalten des Fahrzeugs in Längsrichtung auf eine Rückmeldung dynamischer Größen verzichtet werden kann, allerdings wird die Bewegung des Stellteils für den Austausch von Informationen mit einer Automation benötigt. Aus diesem Grund wird in diesem Versuch durch die Bewegung des Stellteils in Längsrichtung die aktuell gefahrene Geschwindigkeit wiedergegeben (vgl. Bolte, 1991; Penka, 2001). Dabei entspricht die Geschwindigkeit von 0 km/h einem Stellteilwinkel von -20° und 125 km/h einem Winkel von 5° .

9.1.1.2 Versuchsstrecke

Um den Einfluss der unterschiedlichen Bedienkonzepte auf die Regelqualität der Längs- und Querführung umfassend zu untersuchen, werden den Probanden auf vier Versuchsstrecken unterschiedliche Aufgaben gestellt. Im Folgenden werden diese genauer beschrieben.

Geschwindigkeitswechsel

Die erste Versuchsstrecke besteht aus einer ca. 7 km langen, geraden Autobahn mit drei jeweils 3,85 m breiten Fahrstreifen. Es existieren weder eine Gegenfahrbahn, noch Fremdverkehr oder Sichtverdeckungen. Die Probanden haben die Aufgabe den mittleren Fahrstreifen zu halten und die Geschwindigkeit zügig an die vorgegebene Zielgeschwindigkeit anzupassen. Diese wird durch Verkehrszeichen am Rand der Fahrbahn dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit unter den Probanden zu erreichen, sind die Verkehrszeichen bei Annäherung zunächst inhaltslos (s. Abbildung 9.9 links). Bei einer Entfernung von 40 m ändert sich die Textur und das richtige Verkehrszeichen wird eingeblendet (s. Abbildung 9.9 rechts). Ab diesem Zeitpunkt soll die Versuchsperson die Fahrzeuggeschwindigkeit zügig angleichen.



Abbildung 9.9: Verkehrszeichen für den Geschwindigkeitswechsel

Insgesamt werden die Probanden 20 Mal angewiesen, die Geschwindigkeit zu ändern. Die Wechsel bestehen aus Geschwindigkeitsdifferenzen von 20 km/h und 40 km/h in dem Bereich zwischen 60 km/h und 120 km/h. Jeder der in Tabelle 9.1 dargestellten Wechsel wird dabei zwei Mal gefordert. Die Reihenfolge ergibt sich aus einer Kombination, bei der die Zielgeschwindigkeit des einen Wechsels der Startgeschwindigkeit des folgenden Wechsels entsprechen muss.

Tabelle 9.1: Geschwindigkeitswechsel

VERKEHRSZEICHEN GESCHWINDIGKEIT / (km/h)		
von	→	auf
60	→	80
60	→	100
80	→	60
80	→	100
80	→	120
100	→	60
100	→	80
100	→	120
120	→	100
120	→	80

Um den Probanden ausreichend Zeit zu geben, die geforderte Geschwindigkeitsanpassung durchzuführen, wurden die Verkehrszeichen entsprechend platziert. Grundlage bildete die benötigte Zeit, um bei einer Beschleunigung bzw. Verzögerung von 2 m/s^2 die auftretende Geschwindigkeitsdifferenz abzubauen. Die Entfernung der Verkehrszeichen wurde durch den, in der dreifachen Zeit zurückgelegten Weg definiert. Die Berechnung erfolgte nach Gleichung 9.9.



$$s_{x+1} = \frac{1}{2} a t^2 + v_{x-1} t + s_x + 2 v_x t \quad (9.9)$$

mit

$$t = \frac{1}{a} (v_x - v_{x-1})$$

$$a = 2 \frac{m}{s^2}$$

Da allerdings das Fahrzeugmodell keine kontinuierliche Beschleunigung von 2 m/s^2 aufbringen kann, wurden diese Entfernungen nachträglich geringfügig vergrößert. Die genaue Platzierung der Verkehrszeichen wurde in einem Vorversuch ermittelt.

Fahrstreifenwechsel

Auch diese Strecke besteht aus einer geraden Autobahn mit einer Länge von ca. 5,5 km und einer Fahrstreifenbreite von 3,85 m. Die Aufgabe der Probanden ist es, den Wechsel auf den vorgegebenen Fahrstreifen zügig durchzuführen und dabei die Geschwindigkeit von 120 km/h möglichst konstant zu halten. Die Verkehrszeichen stehen in einem Abstand von 200 m an beiden Seiten des Fahrbahnrandes. Bis zu einer Entfernung von 40 m sind diese inhaltslos (s. Abbildung 9.10 links), wechseln jedoch zu diesem Zeitpunkt die Textur, wie in Abbildung 9.10 rechts dargestellt ist, um dem Probanden den Zielfahrstreifen zu präsentieren.



Abbildung 9.10: Verkehrszeichen für den Fahrstreifenwechsel

Es werden alle Kombinationen von Fahrstreifenwechseln aus Tabelle 9.2 gefordert, die jeweils drei Mal wiederholt werden. Bei den Wechseln vom linken auf den rechten Fahrstreifen sowie vom rechten auf den linken werden die Probanden angewiesen, den mittleren Fahrstreifen direkt zu durchfahren.



Tabelle 9.2: Fahrstreifenwechsel

VERKEHRSSZEICHEN FAHRSTREIFEN		
von	→	auf
links	→	mitte
links	→	rechts
mitte	→	links
mitte	→	rechts
rechts	→	mitte
rechts	→	links

Längs-Querführungsaufgabe

Die dritte Versuchsstrecke besteht aus einer ca. 7,5 km langen, geraden Autobahn mit drei Fahrstreifen. Es handelt sich um eine Kombination von Geschwindigkeitswechsel- und Fahrstreifenwechselaufgabe, die von den Versuchspersonen eine gleichzeitige Änderung der Längs- und Querführungsaufgabe verlangt. Dabei wird den Probanden das genaue Vorgehen überlassen. Die Versuchspersonen können somit zunächst die Geschwindigkeit, den Fahrstreifen oder – im Idealfall – beides gleichzeitig anpassen. Die Abstände der Verkehrszeichen wurden nach Gleichung 9.9 ermittelt und ebenfalls geringfügig angepasst. Wie auch bei den zuvor beschriebenen Strecken sind die Verkehrszeichen zunächst inhaltslos und ändern sich erst bei einer Entfernung von 40 m (s. Abbildung 9.11).



Abbildung 9.11: Verkehrszeichen für den Wechsel von Geschwindigkeit und Fahrstreifen

Die Versuchsstrecke beinhaltet 12 kombinierte Längs-Querführungsaufgaben, die in Tabelle 9.3 dargestellt sind.



Tabelle 9.3: Geschwindigkeits-Fahrstreifenwechsel

VERKEHRSZEICHEN GESCHWINDIGKEIT / (km/h)			VERKEHRSZEICHEN FAHRSTREIFEN		
von	→	auf	von	→	auf
60	→	120	links	→	mitte
60	→	120	rechts	→	mitte
80	→	120	links	→	mitte
80	→	120	rechts	→	mitte
100	→	120	links	→	mitte
100	→	120	rechts	→	mitte
120	→	100	mitte	→	links
120	→	100	mitte	→	rechts
120	→	80	mitte	→	links
120	→	80	mitte	→	rechts
120	→	60	mitte	→	links
120	→	60	mitte	→	rechts

Landstraße

Die vierte Versuchsstrecke soll den Probanden einen Eindruck vermitteln, wie sich das Fahren eines Fahrzeugs mit dem jeweiligen Bedienkonzept gestalten würde. So wird eine 9,5 km lange Landstraße mit zwei 3,85 m breiten Fahrstreifen und zufällig auftretendem Gegenverkehr erstellt. Ein vorausfahrendes Fahrzeug reduziert in Kurven gelegentlich die Geschwindigkeit, um den Fahrer zu einem gleichzeitigen Eingriff in Längs- und Querführung zu zwingen. Die Probanden werden instruiert, die Versuchsstrecke zu durchfahren und sich dabei an die Straßenverkehrsordnung zu halten. Da es sich um eine Landstraße handelt, sollen die Versuchspersonen die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nicht überschreiten. Darüber hinaus wird den Probanden mitgeteilt, den notwendigen Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug einzuhalten und nicht zu überholen. Die Strecke setzt sich aus 13 verschiedenen Teilen zusammen, die in Tabelle 9.4 dargestellt sind. Jede Kurve wird dabei drei Mal wiederholt.



Tabelle 9.4: Landstraße

Streckenelement	Ausprägung	Radius	Länge
Gerade			150
Gerade			180
Gerade			200
Gerade			210
Gerade			230
Gerade			250
Gerade			350
Kurve	links	250	150
Kurve	links	450	170
Kurve	links	720	200
Kurve	rechts	250	150
Kurve	rechts	450	170
Kurve	rechts	720	200

9.1.2 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv des ersten Versuchs besteht aus 24 Versuchspersonen (17 männlich, 7 weiblich). Das Durchschnittsalter beträgt 32,96 Jahre bei einer Standardabweichung von 11,54 Jahren (männlich: $M = 35,12$ Jahre, $SD = 12,60$ Jahre; weiblich: $M = 27,71$ Jahre, $SD = 5,70$ Jahre). Dabei ist der jüngste Teilnehmer 19 Jahre und der älteste 59 Jahre alt. Die durchschnittliche Dauer des Führerscheinesbesitzes beträgt 15,17 Jahre ($SD = 11,86$ Jahre).

Das Kollektiv setzt sich zu einem großen Teil aus Mitarbeitern des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München und Studenten der Fakultät für Maschinenwesen zusammen.

Alle Probanden verfügen über eine normale beziehungsweise durch optische Hilfsmittel korrigierte Sehschärfe und keinerlei Einschränkungen der motorischen Fähigkeiten.

9.1.3 Versuchsablauf

Jede Versuchsperson absolviert insgesamt 16 Messfahrten. Dabei fahren die Probanden mit jedem der vier Bedienkonzepte alle vier zuvor beschriebenen Versuchsstrecken.

Nach dem Ausfüllen des demographischen Fragebogens und einer Einweisung in den Fahrsimulator absolvieren die Versuchspersonen die vier Messfahrten mit dem ersten Bedienkonzept. Dabei füllen die Probanden nach jeder Fahrt den NASA-TLX



Fragebogen zur Bewertung der Beanspruchung aus. Nach Abschluss der vierten Strecke werden die Probanden gebeten, den PSSUQ-Fragebogen auszufüllen und dadurch das erlebte Bedienkonzept zu bewerten. Die Reihenfolge der Bedienkonzepte wird für jede Person permutiert.

Bei jedem Wechsel des Stellteils haben die Probanden Gelegenheit, sich durch eine Eingewöhnungs- und Lernfahrt von ca. 10 Minuten an das neue Konzept zu gewöhnen. Die Eingewöhnungsstrecke beinhaltet dabei alle drei Aufgaben, die bei der Messfahrt gefordert werden. Da sich die Landstraßenfahrten nicht mit den anderen Messstrecken, sondern nur unter den verschiedenen Bedienkonzepten vergleichen lassen, wird auf diesen Teil der Eingewöhnung verzichtet. Um einen gleichmäßigen Übungsgrad zu gewährleisten, wird stattdessen die Landstraßenfahrt immer als letzte Versuchsstrecke absolviert. Eine beispielhafte Versuchsdurchführung einer konkreten Versuchsperson folgt diesem Ablauf:

1. Einführung und demographischer Fragebogen
2. Konventionell
 - Eingewöhnungsfahrt
 - 4 Messfahrten
 - Geschwindigkeitswechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Fahrstreifenwechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Längs-Querführungsaufgabe → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Landstraße → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Ausfüllen des PSSUQ
3. Sidestick
 - Eingewöhnungsfahrt
 - 4 Messfahrten
 - Längs-Querführungsaufgabe → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Fahrstreifenwechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Geschwindigkeitswechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Landstraße → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Ausfüllen des PSSUQ
4. Yoke
 - Eingewöhnungsfahrt
 - 4 Messfahrten
 - Geschwindigkeitswechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Längs-Querführungsaufgabe → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Fahrstreifenwechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Landstraße → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Ausfüllen des PSSUQ



5. Yoke / Paddle

- Eingewöhnungsfahrt
- 4 Messfahrten
 - Fahrstreifenwechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Geschwindigkeitswechsel → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Längs-Querführungsaufgabe → Ausfüllen des NASA-TLX
 - Landstraße → Ausfüllen des NASA-TLX
- Ausfüllen des PSSUQ

6. Verabschiedung

9.1.4 Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt auf dem Einfluss der unterschiedlichen Bedienkonzepte auf die Längs- und Querführung bei manueller Fahrt. Somit stellt das Konzept einen Faktor im Versuchsdesign dar.

Um auch Aussagen über die Regelqualität außerhalb der alltäglichen, überschaubaren Landstraßen- und Autobahnfahrt treffen zu können, werden die Probanden einer zeitkritischen Situation ausgesetzt und es wird eine hohe Anforderung an die Fahraufgabe gestellt. So werden die Versuchspersonen angewiesen, den Geschwindigkeits- und/oder Fahrstreifenwechsel zügig durchzuführen.

Während der Landstraßenfahrt hingegen treten keine zeitkritischen Situationen auf. Die Versuchspersonen haben während dieser die Gelegenheit, einen Eindruck von der Handhabung des zugrundeliegenden Bedienkonzepts zu gewinnen. Darüber hinaus dient die Landstraßenfahrt als Maßstab zur Bewertung der Usability.

Penka (2001) berichtet, dass die Zugkraft bei Sidestick-Konzepten besonders bei einer Vollbremsung auf das Schultergelenk des Fahrers gerichtet sei. Da der Sidestick bei dieser Versuchsreihe rechts vom Fahrer an der Armlehne befestigt ist, muss ein Einfluss der Kurvenrichtung und -radius auf die Regelqualität angenommen werden. So wird für die Auswertung der Landstraße die Straßenführung als weiterer Faktor in das Versuchsdesign aufgenommen.

Insgesamt handelt es sich um einen Versuch mit Messwiederholung, bei dem den drei Autobahn-Versuchsstrecken ein einfaktorielles und der Landstraßenfahrt ein zweifaktorielles Versuchsdesign zugrunde liegt.



Um Lerneffekte abzuschwächen, wird sowohl die Reihenfolge der Bedienkonzepte als auch die Reihenfolge der Versuchsstrecken über das Probandenkollektiv permutiert. Da jedoch die Landstraßenfahrt mit den verbleibenden Aufgaben nicht verglichen werden kann, werden nur die Autobahnstrecken systematisch getauscht. So ergeben sich für die Reihenfolge der drei Versuchsstrecken sechs Kombinationen, die in Tabelle 9.5 dargestellt sind.

Tabelle 9.5: Darstellung der möglichen Streckenkombinationen

STRECKENKOMBINATION	1.FAHRT	2.FAHRT	3.FAHRT	4.FAHRT
1	GW	FSW	2D	Landstraße
2	GW	2D	FSW	Landstraße
3	FSW	GW	2D	Landstraße
4	FSW	2D	GW	Landstraße
5	2D	FSW	GW	Landstraße
6	2D	GW	FSW	Landstraße

GW: Geschwindigkeitswechsel

FSW: Fahrstreifenwechsel

2D: Längs-Querführungsaufgabe

Da die vier Bedienkonzepte 24 Kombinationen (vgl. Tabelle 9.6) ermöglichen und somit der Größe des Probandenkollektivs entsprechen, gibt es jede Kombination nur ein Mal. Somit kann auch nicht jede Reihenfolge der Versuchsstrecken mit jedem Bedienkonzept kombiniert werden. Stattdessen werden, um Lerneffekte zu minimieren, die sechs Streckenkombinationen insgesamt vier Mal wiederholt und zufällig auf die Versuchspersonen verteilt. Die einzige Einschränkung besteht darin, dass sich die Reihenfolge der Strecken bei keiner Person wiederholen darf.

Tabelle 9.6: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

VERSUCHSPERSON	1. KONZEPT	2. KONZEPT	3. KONZEPT	4. KONZEPT
1	Konventionell	Sidestick	Yoke	Yoke/Paddle
2	Konventionell	Sidestick	Yoke/Paddle	Yoke
3	Konventionell	Yoke	Yoke/Paddle	Sidestick
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	Yoke/Paddle	Yoke	Konventionell	Sidestick

Bei den Geschwindigkeitswechseln wird jeder Proband instruiert, seine Anpassung zügig durchzuführen. Da jedoch der Fahrer seinen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsverlauf nicht gegen einen objektiven Idealverlauf vergleichen kann, liegt der tatsächliche Eingriff in die Längsführung im Ermessen des Probanden. Daraus resultieren unterschiedliche Beschleunigungsverläufe der einzelnen Versuchspersonen, die eine objektive Bewertung erschweren. Darüber hinaus besitzen die un-



terschiedlichen Stellteile andere geometrische und dynamische Restriktionen, die einen Vergleich zusätzlich behindern.

Die Lösung liegt in einer indirekten Bewertung der Geschwindigkeitsanpassung durch die Beurteilung der sich anschließenden Geschwindigkeitshaltung (vgl. Lange, 2008). Eine schnelle Anpassung der Geschwindigkeit resultiert zwar in einem länger anhaltenden Einpendelvorgang, sorgt aber für einen größeren Betrachtungszeitraum und führt somit zur Relativierung des Regelfehlers. Umgekehrt sorgt ein langsamer Vorgang für geringeres Einpendeln, verkürzt jedoch auch den Betrachtungszeitraum.

So wird der Beginn des Betrachtungsintervalls auf das erste Eintreten der Geschwindigkeit in einen ± 5 km/h großen Korridor um die Zielgeschwindigkeit festgelegt. Die neue Geschwindigkeitsvorgabe definiert das Ende. Abbildung 9.12 zeigt schematisch den Beginn einer Geschwindigkeitsanpassung von 100 auf 120 km/h für einen langsamen, schnellen sowie zunächst falsch ausgeführten Vorgang. Die Qualität der Geschwindigkeitshaltung innerhalb des betrachteten Intervalls wird, wie in Kapitel 8.2 beschrieben, nach Gleichung 8.2 berechnet.

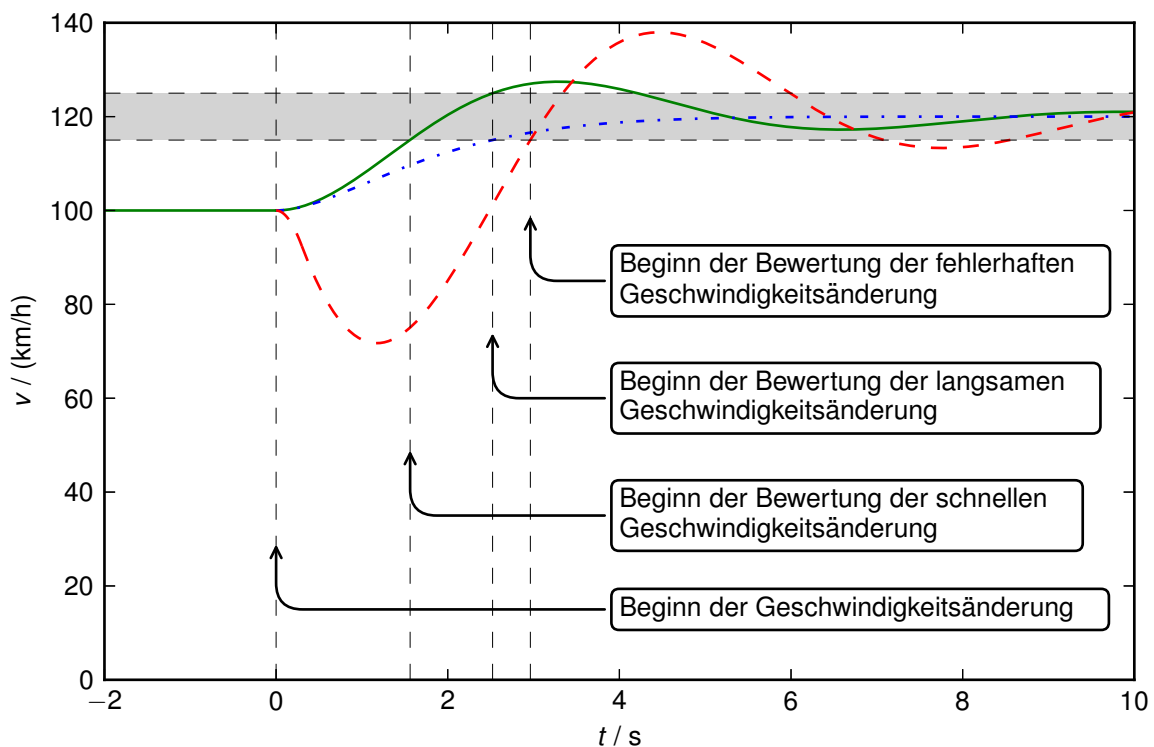


Abbildung 9.12: Trigger zur Bewertung von Geschwindigkeitsänderungen (langsam: blau/Strichpunkt - schnell: grün/durchgezogen - zunächst falsch ausgeführt: rot/gestrichelt)



Die für die Geschwindigkeitsanpassung beschriebene Problematik des fehlenden Idealverlaufs existiert in gleicher Form auch für den Fahrstreifenwechsel. Somit muss auch hier ein geeigneter Beginn des Betrachtungszeitraumes gefunden werden. Das naheliegende Kriterium, den Beginn des Zeitraums auf den Zeitpunkt zu setzen, zu dem der Fahrzeugschwerpunkt in den Zielfahrstreifen eintritt, erzeugt eine hohe mittlere Querablage. Auch ein langsames Wechseln des Fahrstreifens verschlechtert die Qualität, da diese hohe Abweichung zusätzlich langsam abgebaut wird.

Die Festlegung des Zeitpunkts auf den Moment, in dem sich das Fahrzeug zum ersten Mal parallel zum Fahrstreifen bewegt, ermöglicht die Betrachtung der Fahrstreifenwechselqualität ohne Verzerrung durch die genaue Bewegung in den Zielfahrstreifen. Um jedoch die Erfüllung dieses Kriteriums bereits auf dem Startfahrstreifen zu verhindern, muss vorher die Quergeschwindigkeit den in Vorversuchen ermittelten Wert von 0,096 m/s in Richtung des Zielfahrstreifens überschreiten und der Fahrzeugschwerpunkt in den Zielfahrstreifen eintreten. Diese Kriterien schließen zudem den Wechsel auf den falschen Fahrstreifen aus.

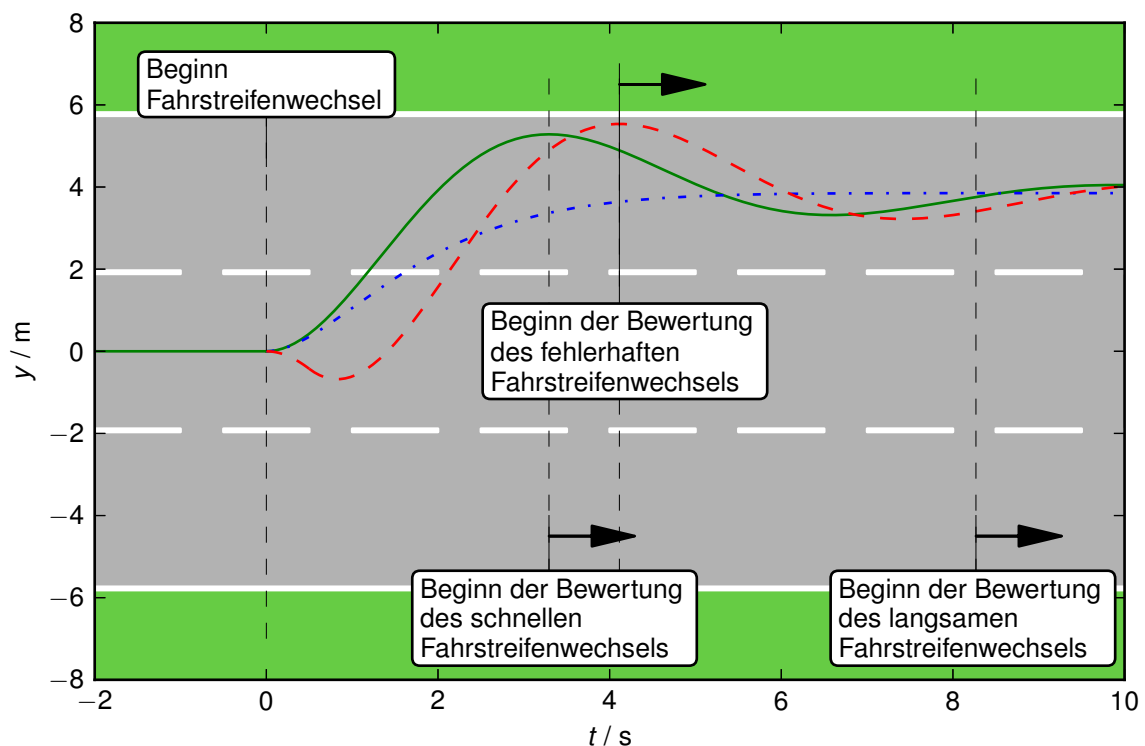


Abbildung 9.13: Trigger zur Bewertung von Fahrstreifenwechseln (langsam: blau/Strichpunkt - schnell: grün/durchgezogen - zunächst falsch ausgeführt: rot/gestrichelt)



Auch bei der lateralen Bewegung gilt, dass eine schnelle Anpassung ein größeres Pendeln verursacht und einen längeren Betrachtungszeitraum einschließt. Abbildung 9.13 zeigt schematisch einen langsamen, schnellen und zunächst falsch ausgeführten Fahrstreifenwechsel. Die Qualität der Querführung wird durch die Seitenführungsqualität nach Reichart (2000) bewertet. Sie wird in Kapitel 8.2 beschrieben und nach Gleichung 8.4 berechnet.

Um den Einfluss des Bedienkonzepts und der Fahraufgabe auf die mentale Beanspruchung der Versuchspersonen bewerten zu können, wird nach jeder Fahrt der Workload mithilfe des ungewichteten NASA-TLX Fragebogens erhoben (vgl. Kapitel 8.2). Die Bewertung der Usability wird abschließend zu jedem Bedienkonzept durch den PSSUQ-Fragebogen erhoben (vgl. Kapitel 8.2).

9.2 Hypothesen

Im Folgenden sind die zu überprüfenden Hypothesen bezüglich des Bedieneinflusses auf die Längs- und Querführungsqualität aufgestellt. Darüber hinaus werden die Hypothesen bezüglich Beanspruchung sowie zur Bewertung der Usability aufgelistet.

Führungsqualität

Während die Stellteile der Längsführung beim konventionellen Bedienkonzept durch die Füße bedient werden, finden die Eingaben bei den alternativen Konzepten am Handstellteil statt. So liegt die Vermutung nahe, dass das Bedienkonzept einen Einfluss auf die Qualität der Längsführung ausübt.

Längs_H₀: Das Bedienkonzept hat keinen Einfluss auf die Längsführungsqualität.

Längs_H₁: Das Bedienkonzept hat einen Einfluss auf die Längsführungsqualität.

Die lenkradbasierten Konzepte können im Gegensatz zum Sidestick mit zwei Händen bedient werden. So kann auch ein Einfluss des Bedienkonzepts auf die Querführungsqualität angenommen werden.

Quer_H₀: Das Bedienkonzept hat keinen Einfluss auf die Querführungsqualität.

Quer_H₁: Das Bedienkonzept hat einen Einfluss auf die Querführungsqualität.

Zur Überprüfung dieser Hypothesen werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung der in Kapitel 8.2 eingeführten Qualität (vgl. Gleichung 8.2 bzw. 8.4) herangezogen.



Die alternativen Bedienkonzepte beruhen auf einem Stellteil, das beide Dimensionen der Fahrzeugführung vereint. Da somit die Regelung der Längs- und Querführung mit denselben Extremitäten stattfindet, liegt die Vermutung nahe, dass sich die Eingaben gegenseitig beeinflussen. So werden zusätzlich die folgenden Hypothesen formuliert:

Interaktion_H₀: Die Längs- und Querführung eines zweidimensionalen Bedienelements beeinflussen sich gegenseitig nicht.

Interaktion_H₁: Die Längs- und Querführung eines zweidimensionalen Bedienelements beeinflussen sich gegenseitig.

Um diese Hypothese zu überprüfen, wird der Korrelationskoeffizient der Steuereingabe ausgewertet.

Beanspruchung

Diese Versuchsreihe stellt die Aufgabe der Geschwindigkeitshaltung an die Längsführung. Da die alternativen Bedienkonzepte prinzipbedingt die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs zurückmelden, ist zu erwarten, dass ein Unterschied in der subjektiven Bewertung der Beanspruchung festzustellen ist. Die entsprechenden Hypothesen sind wie folgt formuliert:

Beanspruchung_1/H₀: Die Bewertung der Beanspruchung ist unabhängig vom Bedienkonzept.

Beanspruchung_1/H₁: Die Bewertung der Beanspruchung ist abhängig vom Bedienkonzept.

Da den Probanden in diesem Versuch sowohl ein- als auch zweidimensionale Aufgaben gestellt werden, liegt die Vermutung nahe, dass die Aufgabe einen Einfluss auf die subjektive Bewertung der Beanspruchung hat.

Beanspruchung_2/H₀: Die Bewertung der Beanspruchung ist unabhängig von der Aufgabenstellung.

Beanspruchung_2/H₁: Die Bewertung der Beanspruchung ist abhängig von der Aufgabenstellung.

Die Überprüfung der subjektiv wahrgenommenen Beanspruchung erfolgt mithilfe des ungewichteten NASA-TLX Fragebogens (vgl. Kapitel 8.2).



Usability

Weiterhin wird der Einfluss des Bedienkonzepts auf die subjektive Bewertung der Usability untersucht. Während die Pedale des konventionellen Bedienkonzepts isomorphe Stellteile darstellen, basieren die alternativen Konzepte auf aktiven Stellteilen. So ist auch bezüglich der subjektiven Bewertung der Usability von einem Einfluss des Konzepts auszugehen. Die entsprechenden Hypothesen sind wie folgt formuliert:

Usability_H₀: Die Bewertung der Usability ist unabhängig vom Bedienkonzept.

Usability_H₁: Die Bewertung der Usability ist abhängig vom Bedienkonzept.

Die Verifizierung der Hypothesen erfolgt anhand des, in Kapitel 8.2 vorgestellten, PSSUQ-Fragebogens.

Das Signifikanzniveau aller statistischen Testverfahren wird auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ festgelegt.

9.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die objektiven sowie die subjektiven Ergebnisse dargestellt. Diese werden bezüglich der abhängigen Variablen (vgl. Kapitel 9.1.4) Qualität von Längs- und Querführung, sowie Workload und Usability bewertet.

9.3.1 Objektive Daten

Zunächst wird auf die objektiven Daten der Längs- und Querführung eingegangen. Dabei werden diese, ausgehend von der jeweiligen Aufgabenstellung Geschwindigkeitswechsel, Fahrstreifenwechsel und Längs-Querführungsaufgabe, getrennt behandelt. Für die Bewertung der Regelqualität werden zunächst die Betrachtungszeiträume jeder Messfahrt zusammengefasst und anschließend wird die Qualität ermittelt.

9.3.1.1 Geschwindigkeitswechsel

Die in Kapitel 9.1.1.2 vorgestellte Aufgabe wird von jedem Probanden mit konventionellem Bedienkonzept, Sidestick sowie Yoke- und Paddle-Konzept durchgeführt. Die mittlere Längsführungsqualität nach Gleichung 8.2 ist in Abbildung 9.14 links dargestellt und zeigt auf, wie gut die Probanden die jeweilige Geschwindigkeitsvorgabe einhalten.



9.3 Ergebnisse

Die betrachteten Zeiträume beginnen dabei, wie in Kapitel 9.1.4 beschrieben, jeweils durch das erste Eintreten der Geschwindigkeit in den ± 5 km/h breiten Korridor um die Zielgeschwindigkeit und enden mit dem Auftauchen der nächsten Geschwindigkeitsvorgabe.

Für die statistische Auswertung wird die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung verwendet. Die Post-hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen werden mit der α -Fehler Korrektur nach Bonferroni durchgeführt.

Allgemein zeigt sich eine hohe (0,96 - 1,0), mittlere Geschwindigkeitshaltequalität. Dies deutet auf eine effektive Bedienung der Längsführung (vgl. Abbildung 9.14 links). Es kann jedoch ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf den Mittelwert festgestellt werden. $F(1.838, 42.264) = 9.579, p < .001, \eta_p^2 = .294$.

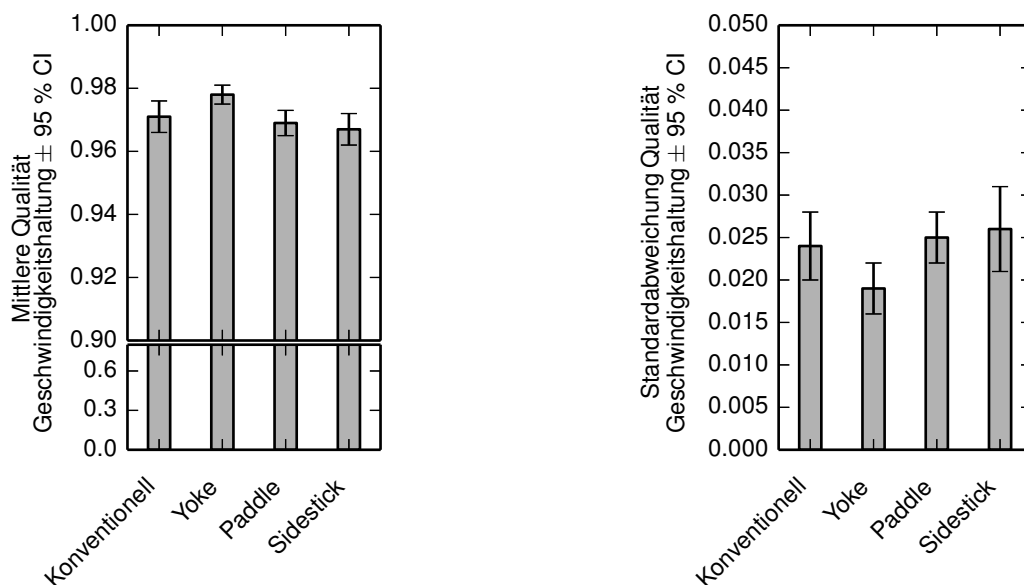


Abbildung 9.14: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeitshaltequalität bei Geschwindigkeitswechseln in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Paarweise Vergleiche zeigen, dass die Probanden mit dem Yoke-Bedienkonzept die Zielgeschwindigkeit signifikant besser einhalten als mit allen anderen Konzepten. So unterscheiden sich das konventionelle Fahren mit Lenkrad und Pedalen ($p = .002$), der Sidestick ($p < .001$) und das Konzept mit Paddle ($p = .001$).

Ein Blick auf die Standardabweichung der Geschwindigkeitshaltequalität zeigt geringe Werte auf und weist auf eine gleichmäßige und ruhige Geschwindigkeitshaltung hin (s. Abbildung 9.14 rechts). Jedoch kann auch hier das Bedienkonzept als Haupteffekt identifiziert und ein Einfluss auf die Standardabweichung der



Geschwindigkeitshaltequalität nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 4.093$, $p = .010$, $\eta_p^2 = .151$. Die Post-hoc-Vergleiche zeigen, dass auch hier das Yoke-Konzept gut abschneidet. So lässt sich ein signifikanter Unterschied zwischen dem Yoke- und dem Paddle-Bedienkonzept nachweisen ($p = .017$). Die gefahrene Geschwindigkeit der Probanden pendelt folglich mit Yoke weniger um die jeweilige mittlere Geschwindigkeit als mit Paddle.

Die mittlere Seitenführungsqualität wird nach Gleichung 8.4 über die gesamte Fahrt ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 9.15 links dargestellt und gibt Aufschluss über die Exzentrizität der gefahrenen Trajektorien.

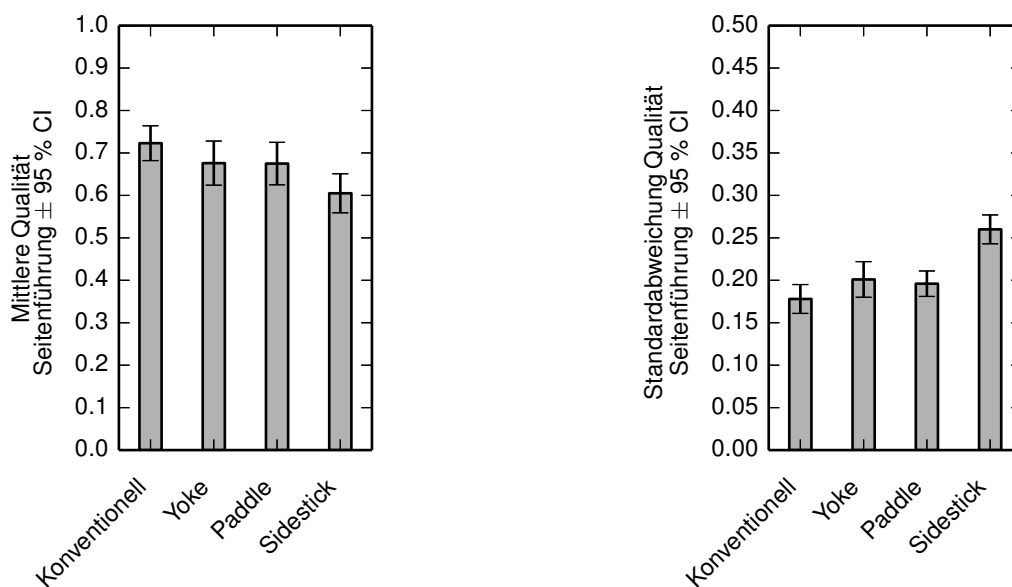


Abbildung 9.15: Mittelwert und Standardabweichung der Seitenführungsqualität bei Geschwindigkeitswechseln in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Auch hier kommt die einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung zum Einsatz. Die Korrektur der Post-hoc-Tests wird ebenfalls nach Bonferroni durchgeführt.

Es kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die mittlere Seitenführungsqualität nachgewiesen werden. $F(2.184, 50.234) = 8.407$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .268$. Die Post-hoc-Vergleiche zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen konventionellem Bedienkonzept und der Variante mit Sidestick ($p < .001$). So halten die Probanden das Fahrzeug mit Sidestick schlechter in der Mitte des Fahrstreifens.



9.3 Ergebnisse

Die Standardabweichung der Seitenführungsqualität zeigt deutliche Unterschiede bezüglich der Bedienkonzepte (s. Abbildung 9.15 rechts). So kann ein signifikanter Haupteffekt des Faktors „Bedienkonzept“ identifiziert werden. $F(3, 69) = 25.192$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .523$. Der paarweise Vergleich zeigt, dass die Standardabweichung des Konzepts mit Sidestick signifikant höher ausfällt als mit allen anderen Bedienkonzepten (jeweils $p < .001$). Somit pendeln die Probanden mit Sidestick stärker im Fahrstreifen und führen häufiger Lenkkorrekturen durch.

9.3.1.2 Fahrstreifenwechsel

Auch diese Aufgabe wird von jedem Probanden mit jedem Bedienkonzept durchgeführt. Dabei wird die Geschwindigkeitshaltung während der Fahrstreifenwechsellaufgabe nach Gleichung 8.2 bewertet. Die Zielgeschwindigkeit v_{Ziel} wird konstant auf 120 km/h gehalten und die gesamte Fahrt betrachtet.

Der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Längsführungsqualität ist in Abbildung 9.16 dargestellt.

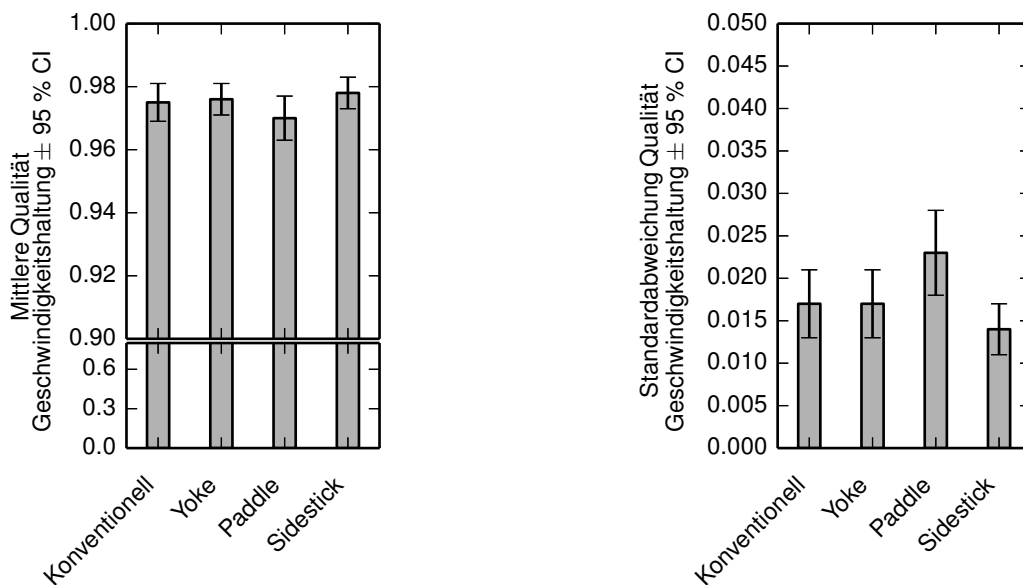


Abbildung 9.16: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeitshaltequalität bei Fahrstreifenwechseln in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Bei der Fahrstreifenwechsellaufgabe zeigt sich insgesamt ebenfalls eine hohe Geschwindigkeitshaltequalität. Dies deutet auf eine effiziente Geschwindigkeitsregelung hin. Es kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die



mittlere Längsführungsqualität mithilfe der einfaktoriellen ANOVA nachgewiesen werden.

Die Standardabweichung hingegen unterscheidet sich abhängig vom verwendeten Bedienkonzept (vgl. Abbildung 9.16 rechts). So kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Geschwindigkeitsregelung nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 4.271$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .157$. Post-hoc-Vergleiche zeigen eine signifikant geringere Standardabweichung der Geschwindigkeitshaltequalität des Sidestick-Konzepts im Vergleich zum Konzept mit Paddle ($p = .043$). Die Probanden können die Geschwindigkeit mit Sidestick besser konstant halten als bei dem Konzept mit Paddle.

Die Bewertung der Fahrstreifenwechsel erfolgt nach Gleichung 8.4. Dabei werden die betrachteten Zeiträume durch die in Kapitel 9.1.4 beschriebenen Kriterien festgelegt. Der Mittelwert sowie die Standardabweichung sind in Abbildung 9.17 abgebildet.

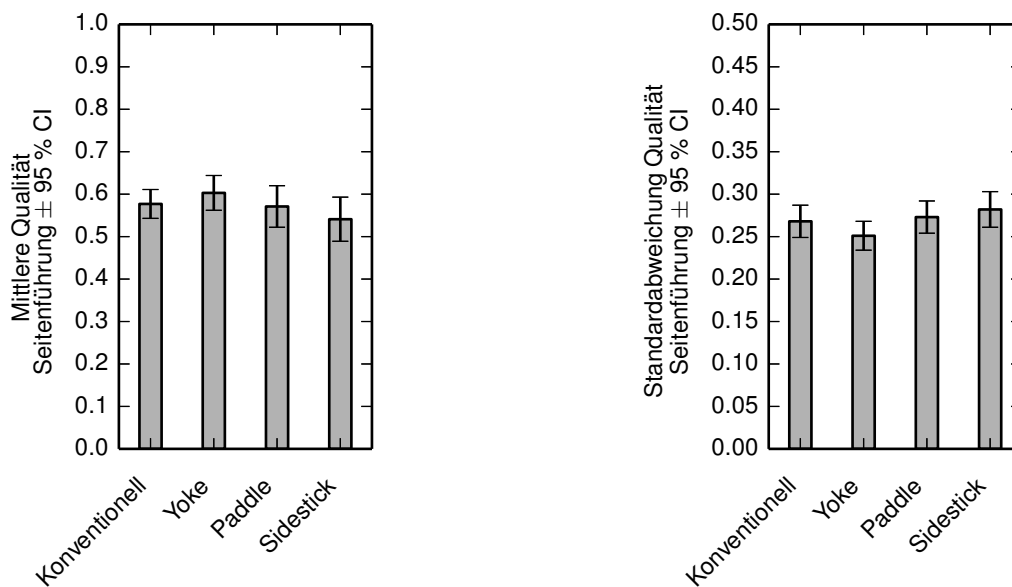


Abbildung 9.17: Mittelwert und Standardabweichung der Seitenführungsqualität bei Fahrstreifenwechseln in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

In der Querführung kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die mittlere Seitenführungsqualität festgestellt werden.

Allerdings kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Standardabweichung der Seitenführungsqualität nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 3.131$,

$p = .031$, $\eta_p^2 = .120$. Zwar können die Post-hoc-Vergleiche keinen signifikanten Unterschied unter den Bedienkonzepten feststellen, jedoch zeichnet sich eine tendenziell größere Standardabweichung bei der Verwendung des Paddle gegenüber dem Yoke-Konzept ab ($p = .087$).

9.3.1.3 Längs-Querführungsaufgabe

Die Längs-Querführungsaufgabe wird von jeder Versuchsperson mit jedem Bedienkonzept absolviert. Dabei wird die Geschwindigkeitshaltequalität über die Zeiträume, die in Kapitel 9.1.4 definiert wurden, untersucht. Die Qualität wird nach Gleichung 8.2 ermittelt.

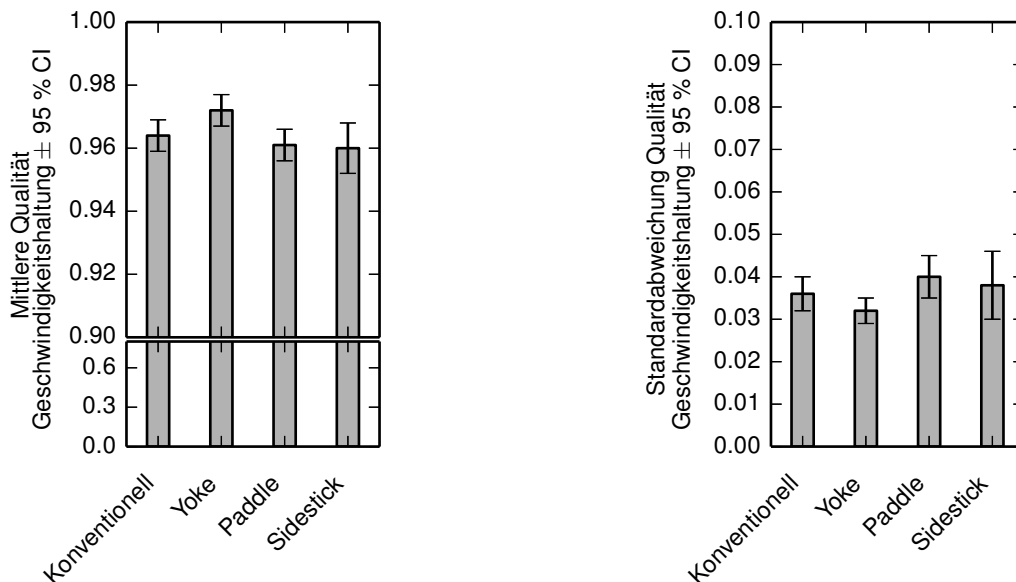


Abbildung 9.18: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeitshaltequalität bei Längs-Querführungsaufgabe in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Ein Blick auf die mittlere Längsführungsqualität (s. Abbildung 9.18 links) zeigt, wie auch bei den vorher beschriebenen Aufgaben, eine hohe Qualität. Jedoch kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf den Mittelwert nachgewiesen werden. $F(1.893, 43.536) = 6.864$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .230$. Post-hoc-Vergleiche zeigen einen signifikanten Unterschied der mittleren Längsführungsqualität bei der Verwendung des Yoke gegenüber allen anderen Bedienkonzepten. So können die Probanden mit Yoke gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept ($p = .007$), dem Sidestick ($p = .019$) und dem Konzept mit Paddle ($p < .001$) die vorgegebene Geschwindigkeit signifikant besser halten.



Eine Untersuchung der Standardabweichung zeigt jedoch keinen signifikanten Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ (s. Abbildung 9.18 rechts).

Die Seitenführungsqualität wird nach Gleichung 8.4 ermittelt. Die untersuchten Zeiträume ergeben sich durch die in Kapitel 9.1.4 beschriebenen Kriterien.

Ein Blick auf die mittlere Seitenführungsqualität (s. Abbildung 9.19 links) zeigt Unterschiede bezüglich des Bedienkonzepts. Die einfaktorielle ANOVA weist einen signifikanten Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf den Mittelwert nach. $F(3, 69) = 6.965$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .232$. Der paarweise Vergleich zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen konventionellem Bedienkonzept und Sidestick ($p < .001$). Somit können die Probanden mit Sidestick das Fahrzeug schlechter in der Fahrstreifenmitte halten.

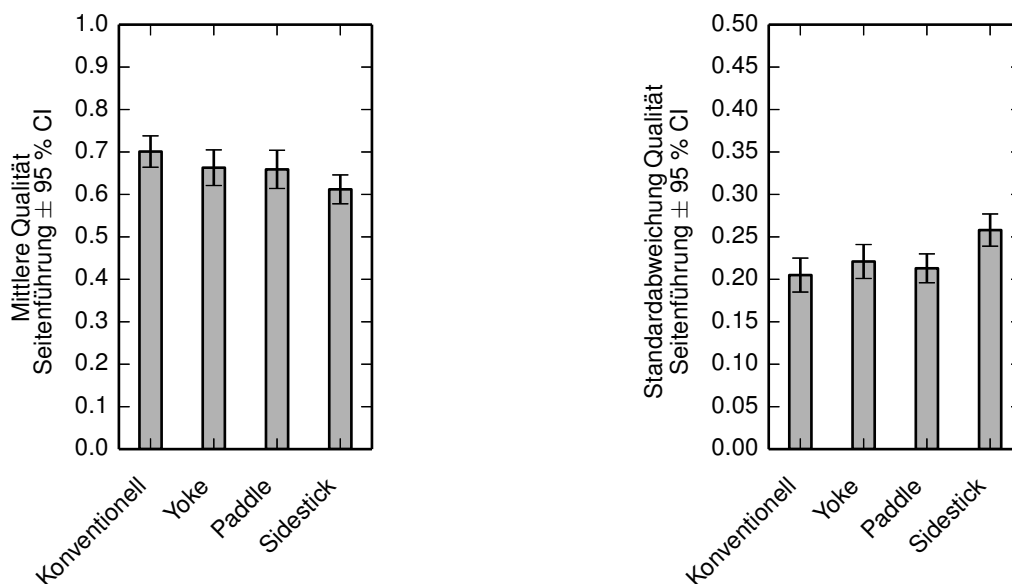


Abbildung 9.19: Mittelwert und Standardabweichung der Seitenführungsqualität bei Längs-Querführungsaufgabe in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Auch bei der Standardabweichung der Seitenführungsqualität (s. Abbildung 9.19 rechts) kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 16.230$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .414$. Hier zeigen Post-hoc-Vergleiche einen signifikanten Unterschied zwischen konventionellem Bedienkonzept und Sidestick ($p < .001$). Die Probanden pendeln mit dem Sidestick signifikant stärker im Fahrstreifen. Dieser Effekt kann auch im Vergleich zum Yoke ($p = .001$) und zum Bedienkonzept mit Paddle ($p < .001$) beobachtet werden.

9.3.1.4 Landstraße

Auch die Landstraße wird von jedem Probanden mit jedem Bedienkonzept absolviert. Die Qualität der Längsführung wird bei dieser Messfahrt nicht ermittelt, da den Probanden hier keine explizite Vorgabe gemacht wurde. Zwar ist ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, das mehrmals die Geschwindigkeit wechselt, jedoch wird den Probanden keine Instruktion gegeben, wie schnell sie sich auf der Straße fortbewegen sollen.

Die Spurhaltequalität wird nach Gleichung 8.4 über die gesamte Fahrt ermittelt. Da die Strecke aus sechs Kurventypen sowie Geraden besteht, werden diese Ausprägungen des Faktors „Straßenführung“ in die Auswertung aufgenommen. Das Ergebnis ist in den Abbildungen 9.20 und 9.21 dargestellt.

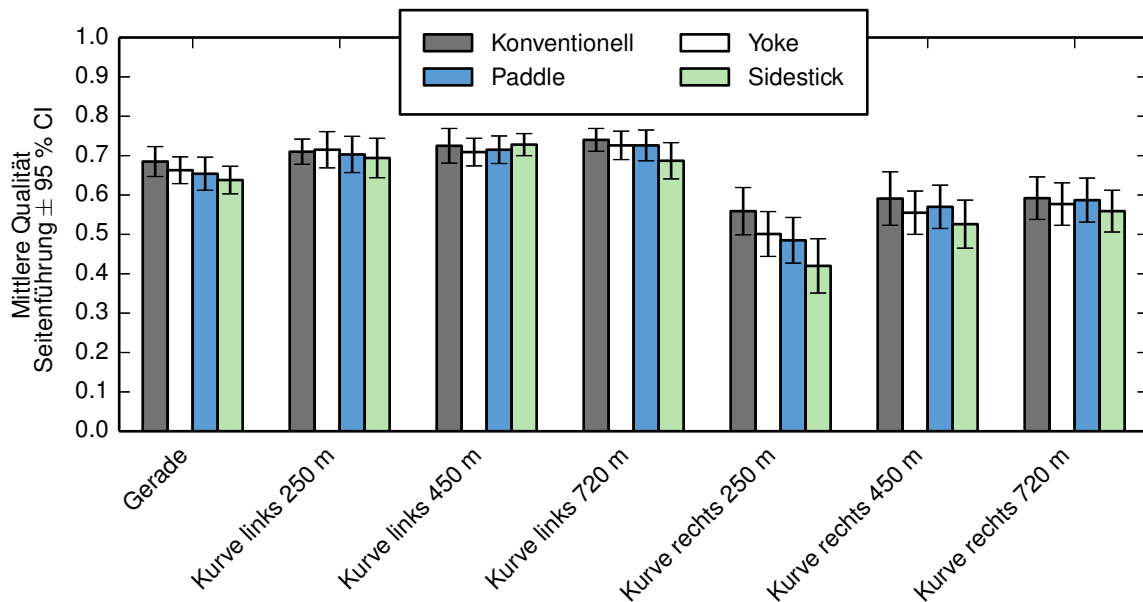


Abbildung 9.20: Mittelwert der Seitenführungsqualität in Abhängigkeit der Faktoren „Bedienkonzept“ und „Straßenführung“ (N = 24)

Mithilfe der zweifaktoriellen Varianzanalyse können die beiden möglichen Haupteffekte „Bedienkonzept“ und „Straßenführung“ auf die mittlere Seitenführungsqualität statistisch nachgewiesen werden. Bedienkonzept: $F(3, 69) = 4.630$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .168$; Straßenführung: $F(2.498, 57.443) = 48.943$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .680$. Eine Interaktion erster Ordnung der beiden Faktoren kann nicht festgestellt werden.

Post-hoc-Einzelvergleiche zeigen einen signifikanten Unterschied der mittleren Seitenführungsqualität zwischen konventionellem Bedienkonzept und Sidestick ($p = .006$). Dabei können die Probanden mit Sidestick signifikant schlechter in der Mitte des Fahrstreifens fahren.



Bei Betrachtung der Post-hoc-Einzelvergleiche bezüglich der unterschiedlichen Straßenführung zeigen sich signifikante Unterschiede der mittleren Seitenführungsqualität zwischen der Geraden und der Linkskurve mit 450 m Kurvenradius ($p = .025$). Die Probanden können bei der Linkskurve unabhängig vom Bedienkonzept das Fahrzeug besser in der Fahrstreifenmitte halten. Auch bei der Linkskurve mit 720 m fahren die Probanden signifikant weiter in der Fahrstreifenmitte ($p = .004$). Im Vergleich der Geraden mit allen Rechtskurven fällt auf, dass der Mittelwert signifikant höher ist und damit die Probanden auf gerader Strecke signifikant weiter in der Fahrstreifenmitte fahren (jeweils $p < .001$). Durch die Linkskurve mit 250 m Kurvenradius wird im Vergleich zu den Rechtskurven signifikant weiter in der Fahrstreifenmitte gefahren (jeweils $p < .001$). Auch die Linkskurven mit 450 m und 720 m Kurvenradius werden gegenüber den Rechtskurven signifikant weiter in der Mitte durchfahren (jeweils $p < .001$). Innerhalb der Rechtskurven kann ebenfalls ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. So ist der Mittelwert bei 250 m Kurvenradius signifikant kleiner als bei 450 m und bei 720 m Kurvenradius (jeweils $p = .001$).

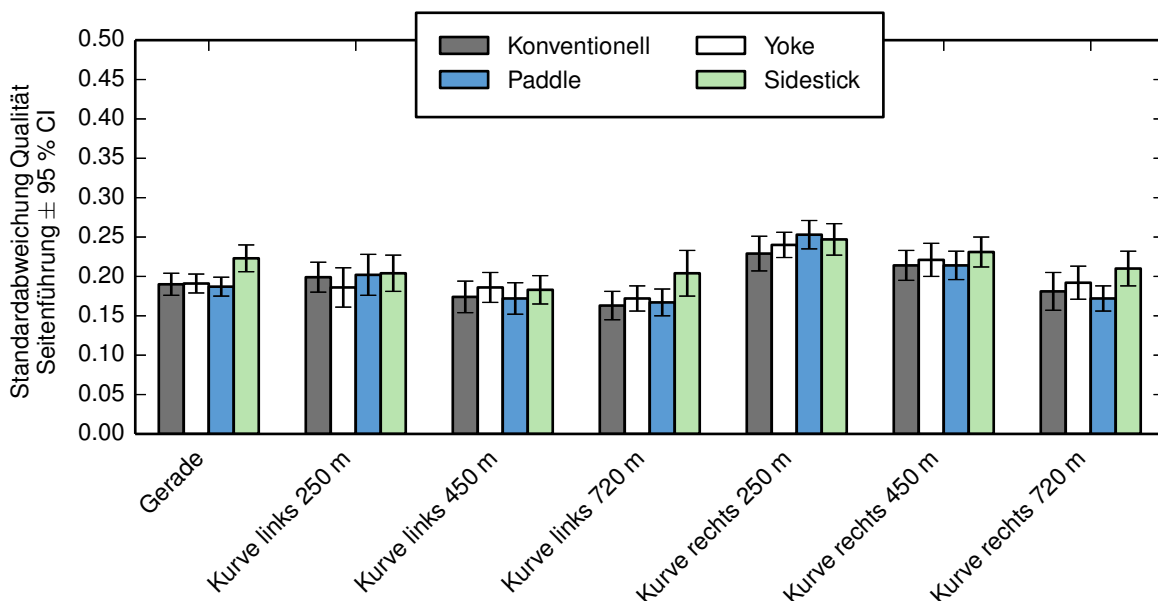


Abbildung 9.21: Standardabweichung der Seitenführungsqualität in Abhängigkeit der Faktoren „Bedienkonzept“ und „Straßenführung“ (N = 24)

Auch in Bezug auf die Standardabweichung können beide möglichen Haupteffekte nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 9.21). Bedienkonzept: $F(3, 69) = 6.916$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .231$; Straßenführung: $F(6, 138) = 29.481$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .562$. Eine Interaktion erster Ordnung der Faktoren „Bedienkonzept“ und „Straßenführung“ kann nicht bestätigt werden.



Post-hoc-Vergleiche zeigen eine signifikant größere Standardabweichung der Seitenführungsqualität bei Verwendung des Sidestick-Konzepts gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept ($p = .004$), dem Yoke ($p = .036$) sowie dem Paddle ($p = .018$). Die Probanden pendeln mit Sidestick stärker im Fahrstreifen als mit den anderen Konzepten.

Post-hoc-Vergleiche bezüglich des Faktors „Straßenführung“ zeigen signifikante Unterschiede der Standardabweichung bei der Geraden im Vergleich zur Linkskurve mit 720 m ($p = .010$), zur Rechtskurve mit 250 m ($p < .001$) und zur Rechtskurve mit 450 m Kurvenradius ($p = .025$). Dabei ist die Standardabweichung bei der Linkskurve signifikant kleiner als bei der Geraden und zeigt somit, dass die Versuchspersonen bei der Linkskurve mit 720 m Kurvenradius weniger pendeln. Im Vergleich zu den Rechtskurven mit 250 m und 450 m Kurvenradius wird jedoch die Gerade ruhiger durchfahren. Die Standardabweichung bei der Linkskurve mit 250 m Kurvenradius fällt signifikant höher aus als bei 450 m ($p = .006$) und 720 m Kurvenradius ($p = .008$). Gegenüber der Rechtskurve mit 250 m zeigt die Linkskurve mit 250 m allerdings eine ruhigere Fahrweise der Probanden ($p < .001$). Die Standardabweichung bei der Linkskurve mit 450 m Kurvenradius fällt signifikant geringer aus als bei der Rechtskurve mit 250 m Kurvenradius ($p < .001$) und der Rechtskurve mit 450 m ($p < .001$). Die Kurve links mit 720 m wird signifikant ruhiger durchfahren als die Rechtskurve mit 250 m ($p < .001$) und 450 m ($p < .001$). Die Standardabweichung bei der Rechtskurve mit 250 m Kurvenradius ist signifikant höher als bei 450 m ($p = .042$) sowie 720 m ($p < .001$). Die Rechtskurve mit 450 m Kurvenradius wird signifikant schlechter durchfahren als mit 720 m ($p = .001$).

Für die Untersuchung, ob sich Längs- und Querführung gegenseitig beeinflussen, wird von jeder Person der Korrelationskoeffizient der Steuereingaben nach Pearson ermittelt. Dabei wird die gesamte Fahrt des Geschwindigkeits- sowie des Fahrstreifenwechsels untersucht. Eine Auswertung der kombinierten Längs-Querführungsaufgabe und der Landstraßenfahrt ist für diese Fragestellung sinnlos, da gleichzeitige Eingriffe in Längs- und Querführung der Probanden gefordert werden. So wird die Versuchsperson z. B. auf der Landstraße in den Kurven durch das vorausfahrende Fahrzeug gezwungen, zusätzlich die Geschwindigkeit zu reduzieren.

Zur Bewertung werden, soweit möglich, die durch die Versuchspersonen auf das Stellteil aufgebrachten Kräfte herangezogen. Eine Auswertung der Stellteilwinkel würde durch die Trägheit des jeweiligen Bedienelements zu einer Glättung des Signals führen. Während bei den Konzepten Sidestick, Yoke sowie Paddle eine Auswertung der beiden Kraftkomponenten in Längs- und Querführung möglich ist,



muss durch die fehlende Kraftsensorik beim konventionellen Bedienkonzept auf die Winkel der Pedale zurückgegriffen werden.

Ein Blick auf den Boxplot der Geschwindigkeitswechsellaufgabe (s. Abbildung 9.22 links) zeigt keinen nennenswerten Zusammenhang der Eingaben von Längs- und Querführung. Der Pearson-Korrelationskoeffizient liegt bis auf wenige Ausreißer unabhängig vom Bedienkonzept innerhalb der Grenze von 0,1 für kleine Effekte (vgl. Cohen, 1969).

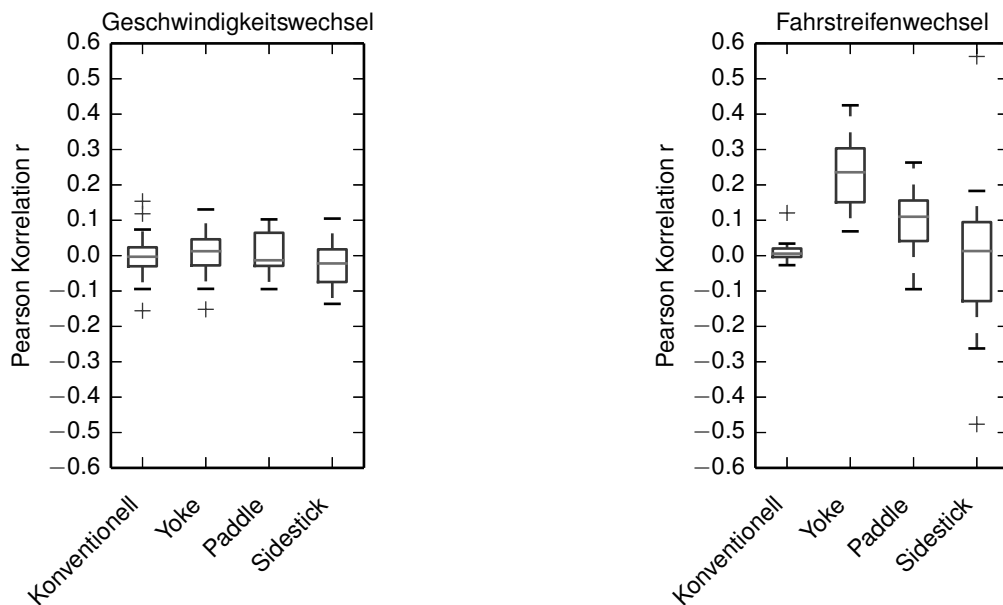


Abbildung 9.22: Pearson Korrelation r der Steuereingaben von Längs- und Querführung bei Geschwindigkeitswechsel (links) und Fahrstreifenwechsel (rechts) in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24)

Bei der Fahrstreifenwechsellaufgabe (s. Abbildung 9.22 rechts) zeigen sich jedoch Unterschiede zwischen den Bedienkonzepten. So steigt z. B. die Korrelation beim Yoke-Konzept an die Grenze zwischen der kleinen und mittleren Effektgröße. Dies lässt sich durch die, im Vergleich zur Geschwindigkeitswechsellaufgabe, größeren durchzuführenden Stellteilbewegungen erklären. Denselben Sachverhalt beschreibt Eckstein (2001) im Zusammenhang mit aktiven Sidesticks. Durch die Einführung eines Längsdynamikreglers und einer „Totzone“ um die Handkraft von null, in der keine Beschleunigung oder Verzögerung an das Fahrzeug kommandiert wird, entgegenet er dieser Problematik. Auch beim Yoke-Bedienkonzept könnte diese Lösung umgesetzt werden, um einen ungewollten Eingriff des Fahrers in Längsrichtung zu vermeiden. Darüber hinaus würde ein Längsdynamikregler einen Gewinn an Komfort bedeuten, da der Fahrer zum Halten der Geschwindigkeit keine Kraft aufbringen

müsste. Durch eine Umsetzung dieser Verbesserung würde die Wechselwirkung von Längs- und Querführungseingaben die praktische Relevanz verlieren, weshalb auf eine statistische Auswertung verzichtet wird.

9.3.2 Subjektive Daten

Für die Untersuchung des Workloads werden die Ergebnisse aller NASA-TLX Fragebögen ausgewertet. Da jeweils ein Fragebogen pro Aufgabenstellung und Bedienkonzept ausgefüllt wird, lässt sich der Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ sowie des Faktors „Aufgabenstellung“ untersuchen. Abbildung 9.23 zeigt den ungewichteten NASA-TLX Overall Workload Index.

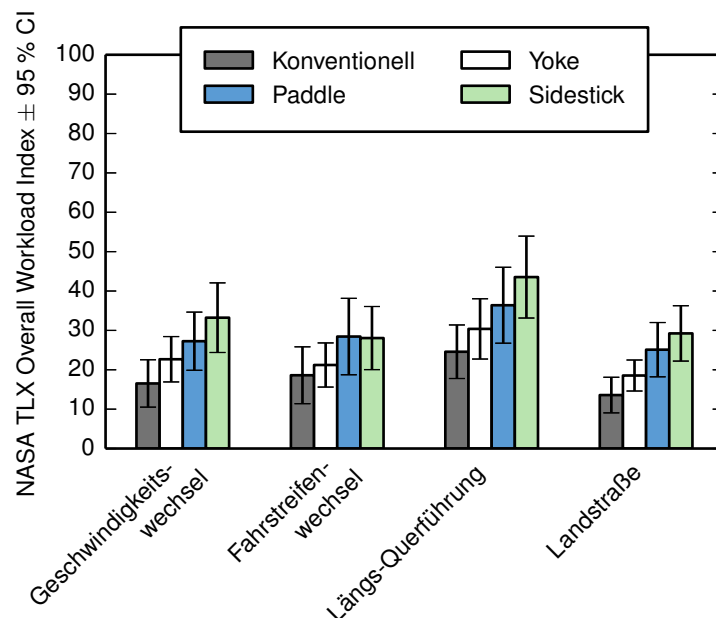


Abbildung 9.23: NASA-TLX Overall Workload Index in Abhängigkeit der Faktoren „Bedienkonzept“ und „Aufgabenstellung“ (N = 24)

Es kann keine Interaktion erster Ordnung zwischen den Faktoren nachgewiesen werden. Durch die zweifaktorielle Varianzanalyse können jedoch beide möglichen Haupteffekte identifiziert werden. Bedienkonzept: $F(3, 69) = 9.905$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .301$; Aufgabenstellung: $F(2.164, 49.781) = 22.440$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .494$.

Post-hoc-Einzelvergleiche zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen dem konventionellen Bedienkonzept und dem Sidestick ($p < .001$). So werden die konventionellen Stellteile als weniger beanspruchend bewertet. Auch gegenüber dem Bedienkonzept mit Paddle wird das konventionelle Konzept signifikant besser bewertet ($p = .014$). Das Konzept mit Sidestick wird darüber hinaus signifikant schlechter als das Yoke-Bedienkonzept bewertet ($p = .029$).



Einzelvergleiche des Faktors „Aufgabenstellung“ zeigen signifikante Unterschiede zwischen der Längs-Querführungsaufgabe und allen anderen Messfahrten (jeweils $p < .001$). Die Probanden bewerten die kombinierte Aufgabe der Geschwindigkeits- und Fahrstreifenanpassung als am stärksten beanspruchend.

Um einen Einblick in die unterschiedliche Bewertung der Bedienkonzepte zu erhalten, ist in Abbildung 9.24 der Mittelwert jedes NASA-TLX Attributes dargestellt. Zwar erlaubt der NASA-TLX keine statistische Auswertung der einzelnen Attribute, jedoch zeigt sich hier, dass grundsätzlich alle Attribute des Sidesticks schlechter bewertet werden als bei dem konventionellen Bedienkonzept.

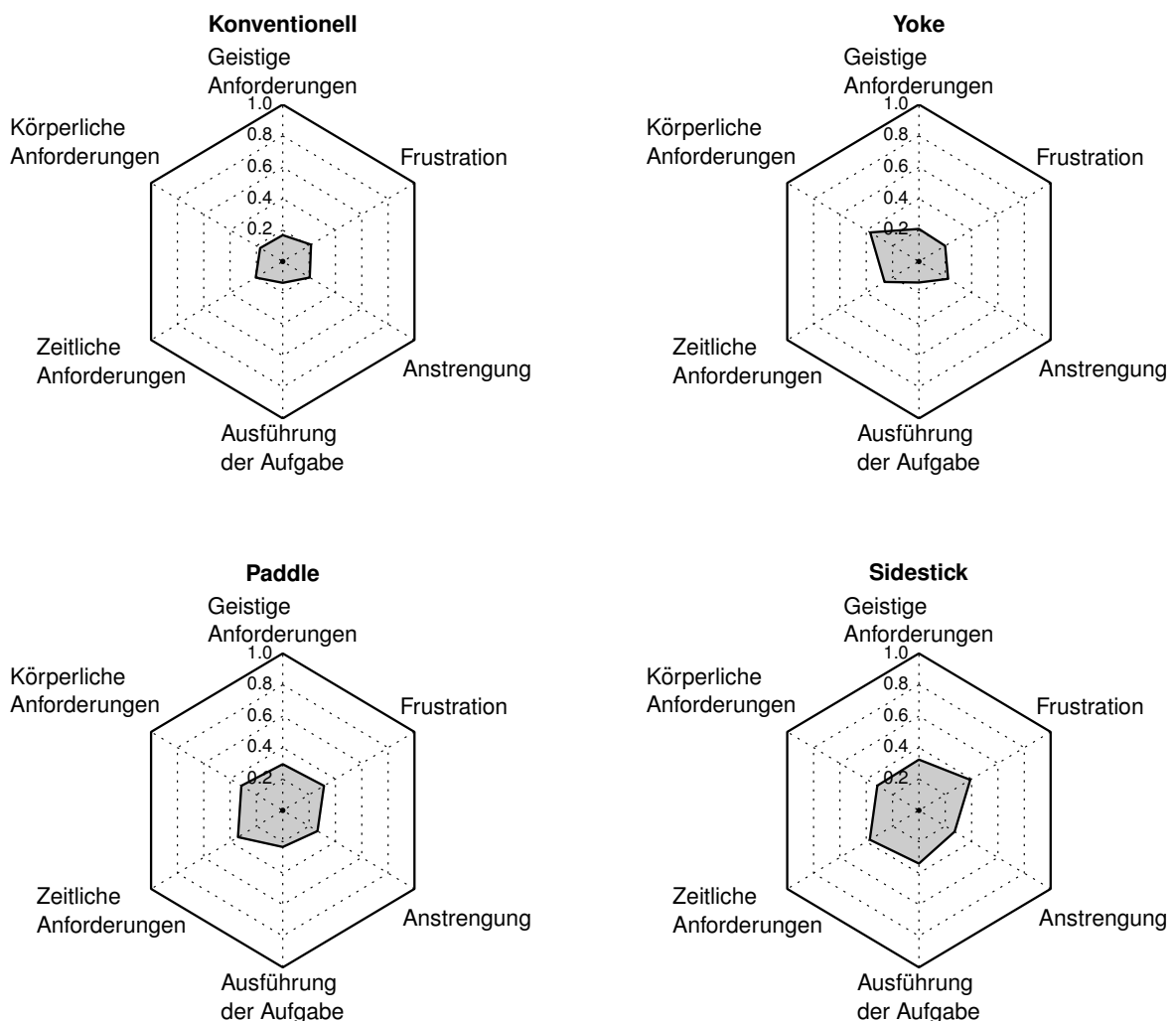


Abbildung 9.24: Mittelwert der NASA-TLX Attribute

Das Bedienkonzept Yoke unterscheidet sich vom konventionellen Fahren hauptsächlich durch das Attribut „körperliche Anforderungen“. Den Eindruck, dass zur Manipulation der Regelstrecke beim aktiven Bedienelement ein hoher Kraftaufwand erforderlich wäre, vermitteln alle Konzepte mit aktiven Stellteilen zur Rückmeldung



der Dynamik. Dies wurde bereits in zahlreichen Simulatorversuchen festgestellt. Vermutlich fehlt dem Benutzer die kinästhetische Rückmeldung, um den Bezug zwischen dem Kraftaufwand und dem daraus resultierenden Einfluss herzustellen.

Zur Bewertung der Usability wird der PSSUQ-Fragebogen herangezogen (vgl. Kapitel 9.1.4). In den Abbildungen 9.25 und 9.26 sind die einzelnen Kriterien „Information Quality“, „Interface Quality“, „System Usefulness“ und „Overall“ dargestellt.

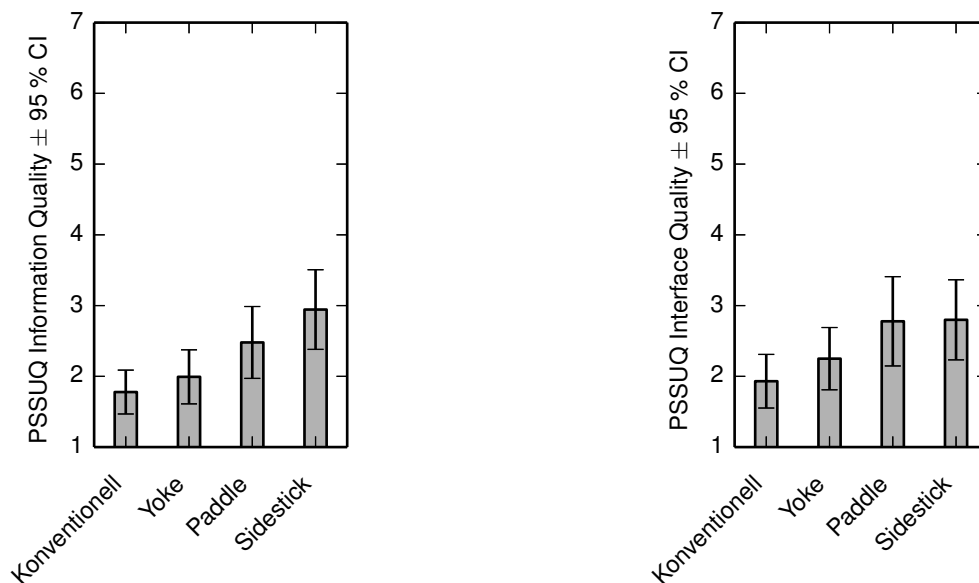


Abbildung 9.25: PSSUQ „Information Quality“ (links) und „Interface Quality“ (rechts) in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24) – hohe Zahlenwerte indizieren niedrige Qualität

Information Quality: Mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf das Item „Information Quality“ nachgewiesen werden. $F(2,156, 49.587) = 10.488$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .313$. Die Post-hoc-Vergleiche zeigen eine signifikant bessere Bewertung des konventionellen Bedienkonzepts im Vergleich zum Sidestick ($p < .001$) und zum Paddle-Konzept ($p = .035$). Darüber hinaus wird das Sidestick-Bedienkonzept signifikant schlechter als das Konzept mit Yoke bewertet ($p = .016$).

Interface Quality: Es kann auch ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf das Item „Interface Quality“ nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 4.956$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .177$. Die Post-hoc-Einzelvergleiche zeigen eine signifikant bessere Bewertung des konventionellen Bedienkonzepts gegenüber der Sidestick-Variante ($p = .015$) sowie dem Paddle-Konzept ($p = .008$).

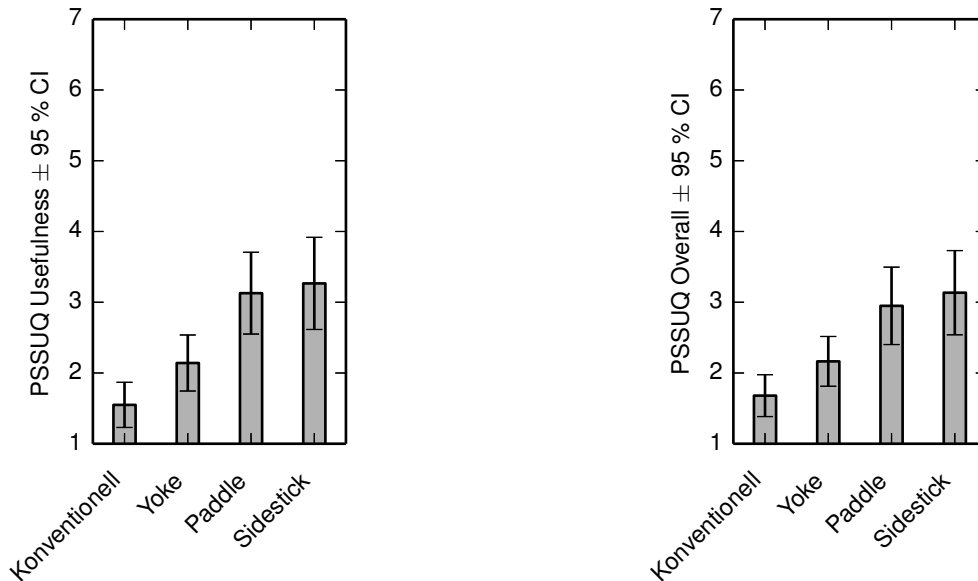


Abbildung 9.26: „PSSUQ Usefulness“ (links) und „Overall“ (rechts) in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 24) – hohe Zahlenwerte indizieren eine schlechte Bewertung

System Usefulness: Bezüglich des Items „System Usefulness“ kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ nachgewiesen werden. $F(3, 69) = 15.958$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .410$. Der paarweise Vergleich zeigt eine signifikant bessere Bewertung des konventionellen Bedienkonzepts gegenüber allen anderen. So werden der Sidestick ($p < .001$), das Yoke-Konzept ($p = .028$) und die Variante mit Paddle ($p < .001$) signifikant schlechter bewertet. Das Yoke-Bedienkonzept wird allerdings besser bewertet als die Variante mit Sidestick ($p = .021$) sowie das Konzept mit Paddle ($p = .004$).

Overall: Es kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auch auf das Item „Overall“ nachgewiesen werden. $F(2.344, 53.904) = 13.932$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .377$. Die Post-hoc-Einzelvergleiche zeigen eine signifikant bessere Bewertung des konventionellen Bedienkonzepts gegenüber allen Alternativen. So wird es gegenüber dem Sidestick ($p < .001$), dem Yoke ($p = .048$) und dem Paddle-Konzept ($p < .001$) besser bewertet. Das Yoke-Konzept schneidet gegenüber Sidestick ($p = .033$) und gegenüber Paddle ($p = .020$) signifikant besser ab.



9.4 Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion

Die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels zeigen einen deutlichen Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Fahrzeugführung. Somit können die Nullhypothesen der Längs- und Querführung zugunsten der Alternativhypothesen (Längs_ H_1 und Quer_ H_1) verworfen werden. Um einen genaueren Vergleich der Bedienkonzepte zu ermöglichen, wird im Folgenden das konventionelle Bedienkonzept als Vergleichsbasis verwendet.

Aus den Ergebnissen aus Kapitel 9.3 lässt sich festhalten, dass sich aus den objektiven Daten kein signifikanter Unterschied der Paddle-Variante gegenüber dem konventionellen Konzept feststellen lässt. Auch das Yoke-Bedienkonzept zeigt keine signifikante Verschlechterung zur konventionellen Fahrzeugführung. Bezüglich der mittleren Geschwindigkeitsregelqualität bei reiner Längsführungsaufgabe sowie kombinierter Längs-Querführung schneidet das Yoke-Konzept sogar signifikant besser ab. Im Vergleich zum Konzept mit Paddle lässt sich in einigen Fällen eine signifikante Verbesserung der Regelqualität nachweisen. Vor dem Erstkontakt erwarteten bereits 19 der 24 Versuchspersonen die Steuerung der Beschleunigung durch Drücken. Folglich können die Bedenken einiger Probanden im Vorversuch, dass die Eingabe der Längsführung umgekehrt und somit der Beschleunigungsvorgang durch Ziehen durchgeführt werden sollte, nicht bestätigt werden.

Die Qualität der Längs- und Querführung bei dem Sidestick zeigt jedoch ein anderes Bild. Bereits im Vorversuch konnte eine Versuchsperson die Querführung mit Sidestick auch nach längerer Eingewöhnung nicht erfolgreich durchführen. So lenkte sie bei linker Querablage noch weiter nach links und bei Annäherung an den rechten Fahrbahnrand noch weiter nach rechts.

Der Vergleich des Sidestick-Konzepts zu den konventionellen Stellteilen ist in Tabelle 9.7 zusammengefasst. Dabei fällt auf, dass der Sidestick in den objektiven Kennwerten insgesamt schlechter abschneidet. Während in der Längsführung keine schlechtere Geschwindigkeitsregelung feststellbar ist, fällt der Sidestick bei der Querführung gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept, außer bei der reinen Fahrstreifenwechsellaufgabe, signifikant schlechter aus. Dies ist vermutlich auf die geringe Übung im Umgang mit dem aktiven Sidestick zurückzuführen. Da sich dieses Konzept grundlegend von den anderen unterscheidet, können verinnerlichte Modelle wahrscheinlich nur bedingt genutzt werden. In diesem Fall könnte die Fahrzeugführung nicht mehr fertigkeitstypisch ablaufen sondern müsste vermehrt



Tabelle 9.7: Vergleich objektiver Daten des Sidestick zum konventionellen Bedienkonzept

Konzept	Aufgabe	Dimension	Kennwert	signifikant
Sidestick	GW	längs	MW	o
			SD	o
		quer	MW	–
			SD	–
	FSW	längs	MW	o
			SD	o
		quer	MW	o
			SD	o
	2D	längs	MW	o
			SD	o
		quer	MW	–
			SD	–
Landstraße	quer	MW	–	
		SD	–	

–: signifikant schlechter +: signifikant besser o: kein Unterschied feststellbar

bewusst erfolgen. Es existieren Veröffentlichungen (z. B. Kienle et al., 2009), in denen sich kein signifikanter Unterschied des Sidestick-Konzepts zur konventionellen Fahrzeugführung nachweisen lässt, jedoch wird in diesen eine alltägliche Fahrt auf breiten Straßen mit großen Kurvenradien simuliert. In der Versuchsreihe der vorliegenden Arbeit wird das entstandene Bedienkonzept explizit in anspruchsvollen Szenarien untersucht. Auch die Landstraßenfahrt stellt hohe Ansprüche an die Querführung durch die Probanden. Zum einen werden kleine Kurvenradien verwendet und zum anderen werden die Versuchspersonen durch abruptes Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs gezwungen, gravierende Eingriffe in Längs- und Querführung gleichzeitig zu tätigen.

Eine Korrelation der Steuereingaben bei zweidimensionalen Bedienkonzepten kann nachgewiesen werden. Zwar ist dieser Effekt gering (vgl. Cohen, 1969), trotzdem muss die Nullhypothese (Interaktion_H₀) verworfen werden. Da bei den Konzepten mit Rückmeldung der Dynamik stets erhöhter Kraftaufwand zur Kompensation des Fahrwiderstands nötig ist, wäre ein unterlagerter Längsregler vorteilhaft. Auch die Probanden verbalisieren diesen negativen Effekt und wünschen sich Unterstützung in Längsrichtung. Der Einfluss eines Reglers würde die Wechselwirkung kompensieren, wodurch die nachgewiesene Korrelation keine praktische Relevanz mehr besäße.

Mithilfe des NASA-TLX Fragebogens kann ein Einfluss des Bedienkonzepts auf den subjektiv empfundenen Workload nachgewiesen werden. Somit kann die Nullhypothese (Beanspruchung_1/H₀) verworfen werden. Es werden das Konzept mit Paddle und besonders die Sidestick-Variante gegenüber dem konventionellen Be-



dienkonzept negativ bewertet. Auch diese Tatsache lässt auf die fehlenden inneren Modelle schließen. Die Bedienung der alternativen Stellteile ist den Versuchspersonen nicht geläufig. Unter dieser Prämisse müsste der Fahrer seine Handlungen durch geistige Leistung bewusst steuern, da die Fahrzeugführung in diesen Fällen nicht mehr fertigkeitbasiert ausgeführt werden könnte. Das Yoke hingegen zeigt keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung. Zwar wird das Item „körperliche Anforderungen“ schlechter bewertet, allerdings liegt dies wahrscheinlich am zurückgemeldeten Fahrwiderstand und könnte durch einen unterlagerten Längsregler kompensiert werden.

Da die Versuchsreihe auch eine Abhängigkeit des Workloads von der gestellten Aufgabe zeigt, kann auch diese Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese (Beanspruchung₂/H₁) verworfen werden. Die Bewertung des Workloads bei der Längs-Querführungsaufgabe wird dabei signifikant höher bewertet als bei allen anderen Aufgaben. Vermutlich liegt dies an der Dimensionalität der geforderten Regelaufgabe. Zwar handelt es sich bei der Fahrzeugführung grundsätzlich um eine zweidimensionale Aufgabe, jedoch ist bei gleichförmiger Fahrt nur eine geringe Regelleistung erforderlich. So finden bei der Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwechsellaufgabe grundlegende Eingriffe nur in Längs- bzw. Querführung statt, während bei der kombinierten Aufgabe eine möglichst gleichzeitige Anpassung an die Vorgaben der beiden Dimensionen gefordert wird.

Da ein Einfluss des Bedienkonzepts auf die Bewertung der Usability nachgewiesen werden kann, muss die Nullhypothese (Usability_{H0}) verworfen werden. So werden sowohl der Sidestick als auch das Konzept mit Paddle gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept in allen Items signifikant schlechter bewertet, während das Yoke bei den Items „System Usefulness“ und „Overall“ eine signifikant geringere Bewertung erreicht. Die Tatsache, dass alle Alternativen bei den Bewertungen durch den PSSUQ-Fragebogen schlechter abschneiden als das konventionelle Bedienkonzept, könnte auf den hohen Übungsgrad der Versuchspersonen zurückgeführt werden. Während alle Probanden dieser Versuchsreihe eine langjährige Erfahrung mit Lenkrad und Pedalerie haben, sind ihnen die alternativen Bedienkonzepte unbekannt. Eine Verzerrung der Usability-Bewertung zugunsten der bekannten, konventionellen Bedienung liegt somit nahe.

Insgesamt schneidet das Yoke sowohl objektiv als auch subjektiv unter den alternativen Konzepten am besten ab. Im Vergleich zu Lenkrad und Pedalen lässt sich nur subjektiv ein signifikanter Unterschied feststellen. Dieser wird durch den PSSUQ-Fragebogen festgehalten und besteht in den Items „System Usefulness“ sowie „Overall“. Für die, in dieser Versuchsreihe untersuchte, manuelle Fahrzeug-



führung scheint die Gebrauchstauglichkeit zwar fragwürdig, im Hinblick auf die kooperative Fahrzeugführung zeigt das Yoke jedoch die in Kapitel 7 angesprochenen theoretischen Vorteile.

Insgesamt kann somit das Yoke-Bedienkonzept als eine Alternative zu den konventionellen Stellteilen angesehen werden, dessen theoretische Stärken bei der kooperativen Fahrzeugführung in der folgenden Versuchsreihe untersucht werden.



10 Versuch zur kooperativen Fahrzeugführung

Die Fragestellung dieser Versuchsreihe steht im Kontext der in Kapitel 6 vorgestellten, kooperativen Fahrzeugführung. Der Fahrer ist bei diesem Konzept zwar in die Fahrzeugführung eingebunden, allerdings kann der Grad der Involvierung variieren. Im Extremfall gibt er die Fahraufgabe an die Automation ab und nimmt die Rolle des Überwachers ein. Wie bei der Teilautomation muss er im Fall einer Fehlfunktion jedoch in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen.

Um den Einfluss des Bedienkonzepts auf die Übernahme zu untersuchen, wird ein Versuch mit der im folgenden Kapitel vorgestellten Methodik durchgeführt. Dabei wird der ungünstigste Fall beleuchtet, der durch den vollständigen Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe entsteht. Wie in dem Automationsgrad der Teilautomation definiert, übernimmt der Fahrer dabei die reine Überwachung und greift nur in seltenen Fällen in die Fahrzeugführung ein.

Zunächst wird in Kapitel 10.1 auf die untersuchten Konzepte eingegangen, die auch in dieser zweiten Versuchsreihe die Voraussetzung für das Verständnis der Hypothesen (Kapitel 10.2) darstellen. In Kapitel 10.3 werden im Anschluss die Ergebnisse präsentiert und in Kapitel 10.4 diskutiert.

10.1 Methodik

10.1.1 Versuchsaufbau

Auch dieser Versuch findet im Fahrsimulator des Lehrstuhls statt, der in Kapitel 8 genauer beschrieben ist. Da die Übernahme der Fahraufgabe bei Fehlfunktion der Automation im Fokus steht, muss die Anzahl der untersuchten Varianten reduziert werden. Ein mehrfach wiederholtes fehlerhaftes Verhalten der Automation würde die Probanden in erhöhte Aufmerksamkeit versetzen und somit große Lerneffekte



erzeugen. So wurden für diesen Versuch zwei der in Kapitel 9 untersuchten Bedienkonzepte ausgewählt und um eine parallel-simultane Automation erweitert. Im Folgenden werden die beiden Konzepte genauer beschrieben.

10.1.1.1 Bedienkonzepte

Konventionelles Bedienkonzept mit Automation

Wie auch bei der ersten Versuchsreihe zur manuellen Fahrt, wird das konventionelle Bedienkonzept mit Lenkrad und Pedalerie als Vergleichsbasis in den Versuch aufgenommen. Jedoch wird das Konzept angepasst, um eine haptische Rückmeldung der Automation zu ermöglichen. Da die Längsführung auf zwei Pedale abgebildet wird, kann keine umfassende Interaktion mit der Automation bewerkstelligt werden. Die isomorphen Eigenschaften der Pedale und der direkte Bezug zwischen Stellteilwinkel und Stellgrößen des Fahrzeugmodells erlauben der Automation lediglich einen indirekten Eingriff in die Längsführung. So kann die Automation zwar nicht selbstständig beschleunigen oder verzögern, den Eingriffswunsch allerdings durch Erzeugen und Bewegen eines Druckpunktes am aktiven Fahrpedal an den Fahrer übermitteln.

Um der Definition der teilautomatisierten Fahrzeugführung zu entsprechen, bei der die Automation die Fahraufgabe übernimmt, werden die Versuchspersonen instruiert, dem Druckpunkt zu folgen. Jedoch werden sie ermutigt, in die Fahrzeugführung einzugreifen, sobald sie dies für notwendig erachten. Durch das vollständige Verschieben des Druckpunktes zum Fahrer hin kann die Automation diesen darauf aufmerksam machen, den Bremsvorgang einzuleiten.

Die Implementierung eines heutigen ACC-Konzepts würde das System zwar dazu befähigen, die Längsführung selbstständig durchzuführen, allerdings wäre dadurch keinerlei haptische Interaktion mit der Automation mehr umsetzbar. Das Bedienkonzept wäre für einen simultanen Eingriff von Fahrer und Automation in die Fahrzeugführung unbrauchbar. Darüber hinaus wäre ein Vergleich mit dem alternativen Konzept nicht möglich, da der Fahrer in diesem Fall keinen Kontakt mehr zu den Stellteilen hätte.

In Querrichtung kann die Automation durch Verlagern der Momenten-Nullstellung des Lenkrads in die Fahrzeugführung eingreifen.

Yoke mit Automation

Da das Yoke im Versuch zur manuellen Fahrt (vgl. Kapitel 9) unter den alternativen Bedienkonzepten sowohl subjektiv als auch objektiv am besten abschneidet, wird



es in die zweite Versuchsreihe aufgenommen. Im Gegensatz zum konventionellen Konzept kann die Automation bei diesem Stellteil direkt in die Längsführung eingreifen und der Fahrer die Handlungen durch die Bewegungen des Stellteils wahrnehmen. Der Eingriff der Automation in Querrichtung gleicht der Variante mit konventionellem Bedienkonzept.

10.1.1.2 Automation

Der in Kapitel 3 beschriebene Mensch-Maschine-Regelkreis mit aktivem Stellteil wird für diese Versuchsreihe um eine parallel-simultane Automation erweitert (s. Abbildung 10.1). Durch den regelungstechnischen Summenpunkt wirken Fahrer und Automation simultan auf die Fahrzeugführung ein.

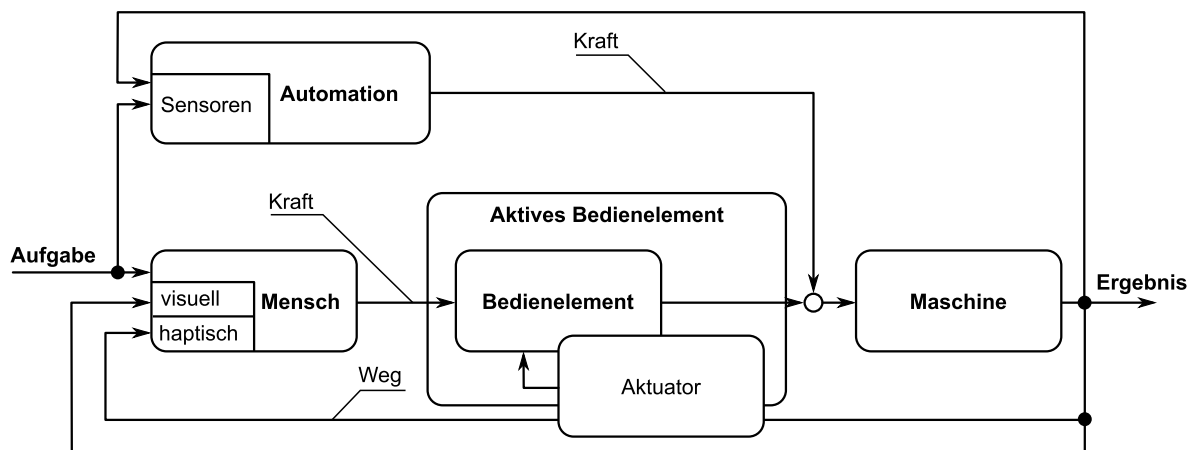


Abbildung 10.1: Erweiterung des Mensch-Maschine-Regelkreises um eine parallel-simultane Automation

Da es sich bei dem im Versuch verwendeten Fahrzeugmodell um ein proprietäres Modell von Müller Systemtechnik handelt und somit keine Informationen über die genauen Parameter und Berechnungen zur Verfügung stehen, wurden alle Reglerparameter der Automation in Vorversuchen bestimmt.

Längsführung

Der Funktionsumfang der Automation in Längsrichtung entspricht einem vereinfachten ACC-Regler. Die Implementierung besteht aus einer Reihe von Modulen, deren Ausgangsvariablen die Führungsgröße für den jeweils folgenden Regelalgorithmus bereitstellen (vgl. Abbildung 10.2). Im Folgenden werden die einzelnen Module sowie deren Ein- und Ausgänge näher erläutert.

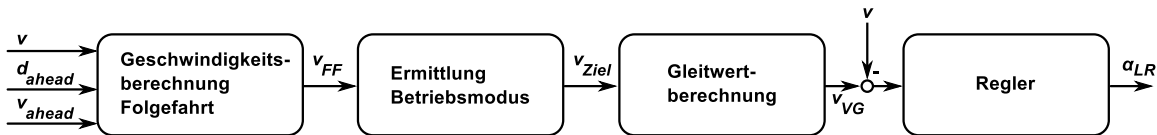


Abbildung 10.2: Regelalgorithmen zur Längsführung

Befindet sich ein vorausfahrendes Fahrzeug im aktuellen Fahrstreifen in einer Entfernung von unter 200 m, erfolgt eine *Geschwindigkeitsberechnung für die Folgefahrt*. Ab diesem Zeitpunkt wird die Geschwindigkeit v_{FF} nach Gleichung 10.1 berechnet, deren erforderliche Variablen v_{ahead} , d_{ahead} sowie v direkt aus der Simulationsumgebung SILAB entnommen werden. Die für die Berechnung benötigte Zeitlücke ist in dieser Versuchsreihe auf eine Sekunde festgelegt und kann von den Versuchspersonen nicht verstellt werden. Da von SILAB die Entfernung zwischen den Schwerpunkten beider Fahrzeuge als Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ermittelt wird, wird dieser für den Regler um 20 m verkürzt. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei längeren Lastkraftwagen der Sicherheitsabstand nicht unterschritten wird.

$$v_{FF} = v_{ahead} + 0,1 \frac{1}{s} (d_{ahead} - 20,0 \text{ m} - 1,0 \text{ s} \cdot v) \quad (10.1)$$

Die Entscheidung, ob es sich bei dem *Betriebsmodus* des entstandenen Szenarios um eine Frei- oder eine Folgefahrt handelt, wird durch das Verhältnis der fest eingestellten Setzgeschwindigkeit von 120 km/h und der errechneten Geschwindigkeit v_{FF} ermittelt. Während es sich bei v_{FF} kleiner als 120 km/h um eine Folgefahrt handelt, bleibt der Modus der Freifahrt bei höherem v_{FF} erhalten. Die geringere der beiden Geschwindigkeiten wird als v_{Ziel} an das Modul zur *Gleitwertberechnung* weitergereicht (s. Abbildung 10.2).

$$v_{Ziel} = \begin{cases} v_{FF} & v_{FF} < 33,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ 33,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} & 33,33 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq v_{FF} \end{cases} \quad (10.2)$$

Dieses Modul sorgt dafür, dass die sprunghafte Änderung der Geschwindigkeitsvorgabe v_{Ziel} (z. B. bei Eintauchen fahrstreifenwechselnder Fahrzeuge) keine abrupten Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsvorgänge hervorruft.

Das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten wird durch ein Annähern der Geschwindigkeitsvorgabe v_{VG} des Reglers an die Zielgeschwindigkeit v_{Ziel} modelliert. Eine einfache Begrenzung des Gradienten auf maximal 2 m/s^2 bzw. minimal



-2 m/s^2 sorgt für eine realistische Anpassung der Geschwindigkeit durch den folgenden *Regler* (s. Abbildung 10.2).

Die von der Automation ermittelte Stellung des virtuellen Fahr- bzw. Bremspedals α_{LR} errechnet sich nach Gleichung 10.3.

$$\alpha_{LR} = 0,36 \frac{\text{s}}{\text{m}} \left(0,83 \frac{\text{m}}{\text{s}} + (\Delta v / \frac{\text{m}}{\text{s}}) \right) \quad (10.3)$$

mit

$$\Delta v = v_{VG} - v$$

Es handelt sich dabei um einen Proportionalregler, der eine bleibende Regelabweichung verursacht. Durch eine Verschiebung des Arbeitspunktes um $0,83 \text{ m/s}$ wird die Abweichung an den, in der Versuchsreihe genutzten, Geschwindigkeitsbereich angepasst. Der geschwindigkeitsabhängige Fehler liegt ab einer Geschwindigkeit von 60 km/h unter zwei Prozent (s. Tabelle 10.1). Da der Geschwindigkeitsbereich dieser Versuchsreihe zwischen 80 km/h und 130 km/h liegt, bietet der Regler eine ausreichende Genauigkeit und wird deshalb nicht durch einen Integralteil zur Kompensation erweitert.

Tabelle 10.1: Regelfehler der Längsführung

Geschwindigkeitsvorgabe / (km/h)	Eingeregelte Geschwindigkeit / (km/h)	Fehler / %
0	1,2	-
30	31,4	4,7
50	51,1	2,2
60	61,0	1,6
70	71,0	1,4
80	80,9	1,1
100	100,3	0,3
110	110,2	0,2
120	120,2	0,2
130	130,2	0,2

Die Interpretation des berechneten Parameters α_{LR} erfolgt anhand des Vorzeichens. Dabei werden Werte größer null als Fahrpedal- und Werte kleiner null als Bremspedalstellung interpretiert. Die Umsetzung des Beschleunigungs- oder Verzögerungswunsches der Automation wird abhängig vom Bedienkonzept unterschiedlich implementiert.

Beim konventionellen Bedienkonzept wird der, nach Gleichung 10.3 berechnete Pedalwinkel als Druckpunkt an das aktive Fahrpedal weitergegeben. Sollte die errechnete Pedalstellung negativ sein, was einem Bremswunsch entspricht, wird der



Druckpunkt auf die Nullposition bewegt. Da die Pedalerie direkt mit dem Fahrzeugmodell verbunden ist, werden nur die vom Fahrer übermittelten Stellgrößen an das Fahrzeug weitergegeben. Somit verzögert, auch bei Stellung des Druckpunkts in Nulllage, das Fahrzeug nur, wenn der Fahrer den Fuß vom Fahrpedal nimmt bzw. das Bremspedal betätigt.

Beim Yoke-Konzept wird der auf das Fahrzeug wirkende Pedalwinkel durch einen virtuellen Summenpunkt berechnet. Die Summanden bestehen aus der Vorgabe der Automation nach Gleichung 10.3 und der virtuellen Pedalstellung nach Gleichung 10.4, entsprechend der aufgebrauchten Kraft des Fahrers. Da in dieser Versuchsreihe weder eine Transition in einen niedrigeren Automationsgrad, noch eine Deaktivierung des Systems möglich ist, müssen die Versuchspersonen die Automation über den Zeitraum der Fehlfunktion dauerhaft überstimmen. Um die Probanden nicht zu stark zu belasten und dadurch die subjektive Bewertung nicht negativ zu beeinflussen, wird der Einfluss der Handkraft F_{Yx} des Fahrers auf die Bremspedalstellung um den, in Vorversuchen ermittelten Faktor skaliert.

$$\alpha_F(F_{Yx}) = \begin{cases} -10 & F_{Yx} < -20 \text{ N} \\ \frac{1}{2} (F_{Yx}/\text{N}) & -20 \text{ N} \leq F_{Yx} < 0 \text{ N} \\ \frac{1}{50} (F_{Yx}/\text{N}) & 0 \text{ N} \leq F_{Yx} \leq 50 \text{ N} \\ 1 & F_{Yx} > 50 \text{ N} \end{cases} \quad (10.4)$$

Die Ermittlung der Stellgrößen findet aus der Resultierenden von α_F und α_{LR} statt. Ist die Summe größer gleich null, so ergibt sich ein Fahrpedalwinkel nach Gleichung 10.5.

$$\alpha_{FP} = \begin{cases} 0 & (\alpha_F + \alpha_{LR}) < 0 \\ \alpha_F + \alpha_{LR} & 0 \leq (\alpha_F + \alpha_{LR}) \leq 1 \\ 1 & (\alpha_F + \alpha_{LR}) > 1 \end{cases} \quad (10.5)$$

Der Winkel des Bremspedals ist in diesem Fall null.

Ist die Summe negativ, so ist der Fahrpedalwinkel null und die Bremspedalstellung ergibt sich nach Gleichung 10.6.

$$\alpha_{BP} = \begin{cases} 1 & (\alpha_F + \alpha_{LR}) < -10 \\ -\frac{1}{10} (\alpha_F + \alpha_{LR}) & -10 \leq (\alpha_F + \alpha_{LR}) \leq 0 \\ 0 & (\alpha_F + \alpha_{LR}) > 0 \end{cases} \quad (10.6)$$



Querführung

Die Querführung besteht ebenfalls aus hintereinandergeschalteten Modulen (s. Abbildung 10.3), die eine starke, mittenzentrierte Spurhalteunterstützung ermöglichen. Da der Versuch auf dem rechten Fahrstreifen beginnt, die Versuchsfahrt jedoch auf dem mittleren Fahrstreifen stattfindet, wurde zusätzlich zur Fahrstreifenregelung eine Fahrstreifenwechselunterstützung implementiert. Diese wird auch zum Ende der Messfahrt benötigt, um einen Fahrstreifenwechsel zurück auf den rechten Fahrstreifen durchzuführen und somit den Versuchspersonen eine realistische Fahrt zu vermitteln. Im Folgenden werden die einzelnen Module sowie deren Ein- und Ausgänge näher erläutert.



Abbildung 10.3: Regelalgorithmen zur Querführung

Um die Trajektorie einer Automation für die Querführung berechnen zu können, werden neben der aktuellen Position und dem weiteren Straßenverlauf eine Reihe zusätzlicher Parameter benötigt. Es sind z. B. der aktuelle Lenkwinkel und ein zweites, identisches Fahrzeugmodell inklusive Lenkdynamik erforderlich.

Da die Parameter des proprietären Fahrzeugmodells nicht zur Verfügung stehen, wird ein vereinfachtes Prinzip angewendet.

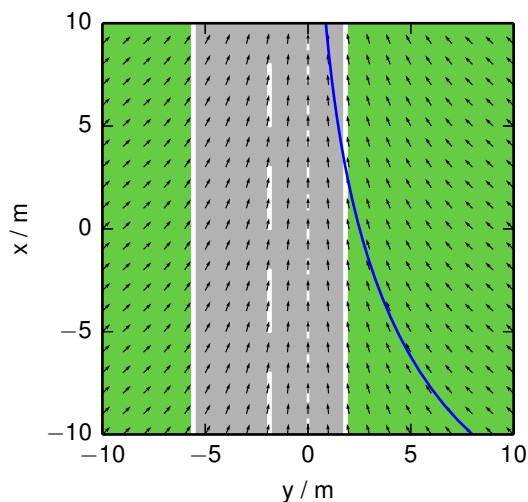


Abbildung 10.4: Vektorfeld zur Orientierung des Fahrzeugs

Die aufwendige Berechnung der tatsächlich zu fahrenden Trajektorie wird durch ein *Vektorfeld* vereinfacht, dessen Vektorrichtung von der Querablage zur Ideallinie y



abhängt und das die Führungsgröße des Reglers verkörpert. Abbildung 10.4 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Die Grafik entspricht jedoch nicht dem tatsächlichen Vektorfeld, sondern die Parameter der Gleichung wurden mit einem Faktor multipliziert, um eine Darstellung zu ermöglichen. Die blau dargestellte Linie stellt eine, aus dem Vektorfeld entstehende, mögliche Trajektorie dar.

Der einzuregelnde Zielkurswinkel $\Delta\psi_{HC}$ wird betragsmäßig linear zur Querablage y größer. Ab einem Betrag von 0,8 rad bleibt der Winkel konstant, um eine Annäherung des Fahrzeugs bei sehr hoher Querablage auf einen Winkel von ca. $45,8^\circ$ ($= 0,8$ rad) zu begrenzen. Die zugehörige Berechnungsvorschrift ist in Gleichung 10.7 dargestellt.

$$\Delta\psi_{HC} = \begin{cases} 0,8 \text{ rad} & y < -26,67 \text{ m} \\ -0,03 \text{ rad} \cdot (y/\text{m}) & -26,67 \text{ m} \leq y \leq 26,67 \text{ m} \\ -0,8 \text{ rad} & 26,67 \text{ m} < y \end{cases} \quad (10.7)$$

Um auch eine Annäherung und Regelung bei Kurvenfahrten zu ermöglichen, wird die nach Gleichung 10.7 berechnete Orientierung $\Delta\psi_{HC}$ als Relativwinkel zur Fahrbahntangente $\psi_{Tangente}$ interpretiert.

Die tatsächliche Zielorientierung des Fahrzeugs ergibt sich aus Gleichung 10.8 und wird an das *Heading-Control* Modul übergeben (s. Abbildung 10.3).

$$\psi_{HC} = \psi_{Tangente} + \Delta\psi_{HC} \quad (10.8)$$

Dieses berechnet aus der von der Trajektorienberechnung ermittelten Zielorientierung ψ_{HC} und der tatsächlichen Orientierung des Fahrzeugs ψ den idealen, normierten Lenkradwinkel δ_{QR} gemäß Gleichung 10.9.

$$\delta_{QR} = 5 \cdot (\Delta\psi/\text{rad}) \quad (10.9)$$

mit

$$\Delta\psi = \psi_{HC} - \psi$$

Die Berechnung des *Fahrstreifenwechsels* wird ebenfalls vereinfacht umgesetzt. Beim Triggern des Wechselmanövers über den Eingang *Manöver* des Moduls wird durch die Änderung der tatsächlichen Querablage zum Zielfahrstreifen y_{Ziel} die Berechnung des Vektorfeldes angepasst (s. Abbildung 10.3). Grundlage hierfür bildet



der idealisierte Fahrstreifenwechsellvorgang, beschrieben durch die zusammengesetzte quadratische Funktion der Gleichung 10.10.

$$y_{FW}(t) = \begin{cases} y_{Ziel}(0) - q t^2 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} t_{FSW} \\ y_{Ziel}(0) - \left(\frac{1}{2} q t_{FSW}^2 - q (t_{FSW} - t)^2\right) & \frac{1}{2} t_{FSW} < t \leq t_{FSW} \\ 0 & t > t_{FSW} \end{cases} \quad (10.10)$$

mit

$$q = 2y_{Ziel}(0)/t_{FSW}^2$$

Die Dauer des Fahrstreifenwechsels t_{FSW} ergibt sich durch eine normal empfundene Querbeschleunigung nach Schimmelpfennig und Nackenhorst (1985). Für diese Versuchsreihe wird t_{FSW} auf 5 s festgelegt.

Die Querablage für die Berechnung des Vektorfeldes y wird anschließend nach Gleichung 10.11 berechnet.

$$y(t) = y_{Ziel}(t) - y_{FW}(t) \quad (10.11)$$

Ein beispielhafter Fahrstreifenwechsel ist in Abbildung 10.5 zu sehen. Dabei ist die geplante Trajektorie blau gestrichelt und die tatsächlich durchgeführte Trajektorie rot dargestellt. Es fällt auf, dass das Fahrzeug der berechneten Trajektorie um ca. eine Sekunde nacheilt. Da jedoch der Fahrstreifenwechsel nicht Gegenstand der Untersuchung ist, wird diese Umsetzung als zufriedenstellend akzeptiert.

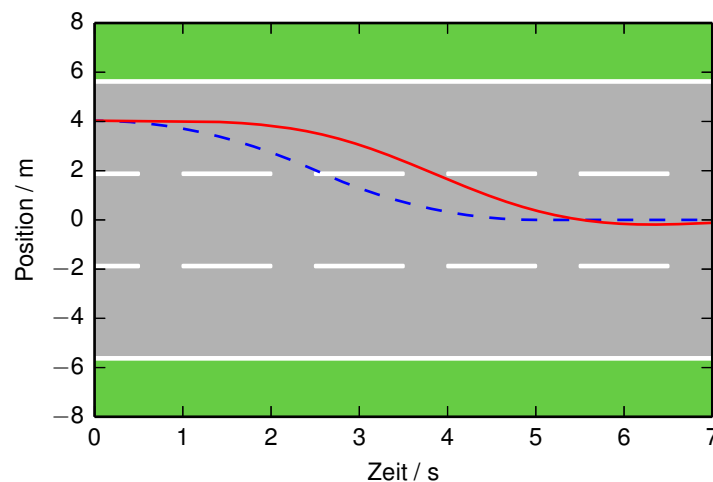


Abbildung 10.5: Fahrstreifenwechsel (geplant: blau/gestrichelt - durchgeführt: rot/durchgezogen)



10.1.1.3 Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke besteht aus einer 35,3 km langen Autobahn mit drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung. Während die Breite der einzelnen Streifen 3,75 m beträgt, wird der Seitenstreifen auf die Breite von 2,5 m festgelegt. Der Fremdverkehr des linken und rechten Fahrstreifens wird in SILAB durch Quellen und Senken modelliert. Zwar ergibt sich daraus eine zufällige Verteilung der Fahrzeuge, jedoch wird auf dichten Verkehr und einen gleichmäßigen Verkehrsfluss geachtet. Um den Eindruck eines künstlichen Szenarios zu reduzieren, entstehen auf dem linken Fahrstreifen zeitweise Lücken. Zu den für die Auswertung relevanten Zeitpunkten ist jedoch sichergestellt, dass beide benachbarten Fahrstreifen belegt sind, um einen Fahrstreifenwechsel der Probanden auszuschließen. Die Fremdfahrzeuge der Gegenfahrbahn werden zufällig erzeugt.

Da es sich um einen Versuch mit Messwiederholung handelt und somit jeder Proband beide Bedienkonzepte fährt, werden zwei Versuchsstrecken eingesetzt. Diese bestehen aus denselben Abschnitten, die in unterschiedlicher Reihenfolge angeordnet sind. Um eine Wiedererkennung auszuschließen, ist die Umgebung der jeweils gleichen Abschnitte unterschiedlich gestaltet. Der Versuch beinhaltet ein kritisches Szenario und eine Fehlfunktion der Automation, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Kritisches Szenario

Bei dem kritischen Szenario tritt auf gerader Fahrbahn eine unvorhersehbare, starke Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs mit 6 m/s^2 von 100 km/h auf 72 km/h ein. Um einer Kollision zu entgehen, muss auch der Proband die Geschwindigkeit reduzieren. Da es sich um keine Fehlfunktion handelt, informiert die Automation den Fahrer haptisch über die notwendige Verzögerung.

Fehlfunktion

Die Fehlfunktion der Automation findet zu Beginn einer Linkskurve mit 1500 m Kurvenradius und einer Länge von 400 m statt. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 110 km/h. Die Automation detektiert das vorausfahrende Fahrzeug nicht mehr und beschleunigt dadurch wieder auf die fest vorgegebene Setzgeschwindigkeit von 120 km/h. Im Konzept mit aktivem Fahrpedal wird die Beschleunigung nur durchgeführt, wenn der Fahrer das Fahrpedal entsprechend drückt. Sollte er den sich entfernenden Druckpunkt nicht wahrnehmen, würde keine Änderung der Geschwindigkeit stattfinden und ein Eingreifen in Längsrichtung wäre nicht nötig. Damit es allerdings zu einem erzwungenen Eingreifen des



Fahrers kommt, verzögert das vorausfahrende Fahrzeug zusätzlich nach 100 m auf 100 km/h.

In Querrichtung werden die Fahrbahnmarkierungen nicht mehr erkannt und es findet somit keine aktive Lenkunterstützung mehr statt. Da dies unmittelbar vor einer Kurve geschieht, muss der Fahrer eingreifen, um nicht mit dem Fremdverkehr des rechten Fahrstreifens zu kollidieren.

10.1.2 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv dieses Versuchs besteht aus 44 Versuchspersonen (22 männlich, 22 weiblich). Das Durchschnittsalter beträgt 31,91 Jahre bei einer Standardabweichung von 11,32 Jahren (männlich: $M = 34,5$ Jahre, $SD = 11,4$ Jahre; weiblich: $M = 29,32$ Jahre, $SD = 10,62$ Jahre). Dabei ist der jüngste Teilnehmer 19 Jahre und der älteste 62 Jahre alt. Die durchschnittliche Dauer des Führerscheinbesitzes beträgt 13,8 Jahre ($SD = 10,93$ Jahre).

Das Probandenkollektiv setzt sich zu einem großen Teil aus Mitarbeitern der Technischen Universität München und Studenten der Fakultät für Maschinenwesen zusammen.

Alle Probanden verfügen über normale beziehungsweise durch optische Hilfsmittel korrigierte Sehschärfe und keinerlei Einschränkungen der motorischen Fähigkeiten.

10.1.3 Versuchsablauf

Diese Versuchsreihe ist als Within-Subjects-Design ausgelegt, sodass jede Versuchsperson die Messfahrt mit beiden Bedienkonzepten absolviert.

Nach dem Ausfüllen des demographischen Fragebogens, einer kurzen Einleitung in die Thematik und der Einweisung in den Fahrsimulator wird das erste Bedienkonzept erklärt. Vor jeder Messfahrt haben die Probanden die Gelegenheit, sich in einer Lernfahrt von ca. sieben Minuten an das Konzept und den Simulator zu gewöhnen. Damit die Versuchspersonen den korrigierenden Eingriff bei der Fehlfunktion später durchführen können, handelt es sich um eine manuelle Fahrt, bei der den Versuchspersonen keinerlei Automation zur Verfügung steht. Im Anschluss absolvieren die Probanden die 20 Minuten lange Versuchsstrecke, bevor sie ihre subjektive Beanspruchung mithilfe des NASA-TLX Fragebogens bewerten. Darüber hinaus füllen



die Versuchspersonen einen Fragebogen zur subjektiven Wahrnehmung der Bedienqualität aus, bevor das zweite Konzept untersucht wird.

Zum Abschluss des Versuchs beantworten die Versuchspersonen einen Fragebogen zu den erlebten Fehlfunktionen, wobei eine direkte Gegenüberstellung der Bedienkonzepte erfolgt.

Eine beispielhafte Durchführung des Versuchs folgt diesem Ablauf:

1. Einführung und demographischer Fragebogen
2. Konventionell
 - Eingewöhnungsfahrt
 - Messfahrt → Ausfüllen des Fragebogens zum Bedienkonzept
3. Yoke
 - Eingewöhnungsfahrt
 - Messfahrt → Ausfüllen des Fragebogens zum Bedienkonzept
4. Ausfüllen des Fragebogens zur Fehlfunktion
5. Verabschiedung

10.1.4 Versuchsdesign – abhängige und unabhängige Variablen

In dieser Versuchsreihe wird der Einfluss des Bedienkonzepts auf die Übernahmefähigkeit untersucht. So müssen die Versuchspersonen die Fehlfunktion der Automation erkennen und entsprechend korrigieren. Den Faktor im Versuchsdesign stellt das Bedienkonzept dar.

Die Probanden werden zu Beginn der Messfahrt instruiert, die Automation entsprechend der Definition der Teilautomatisierung zu überwachen. Darüber hinaus werden sie explizit ermutigt, jederzeit in die Fahrzeugführung einzugreifen, sobald sie dies für nötig halten.

Um den Einfluss von Lerneffekten zu minimieren, wird die Reihenfolge von Fehlfunktion und kritischem Szenario sowie der Bedienkonzepte permutiert. Bei der ersten Versuchsstrecke erreichen die Versuchspersonen nach ca. sechs Minuten das kritische Szenario und nach ca. 16 Minuten die Fehlfunktion. Bei der zweiten Strecke finden die Fehlfunktion nach ca. 13 Minuten und das kritische Szenario nach ca. 15 Minuten statt.

Zur Bewertung der Übernahmequalität wird die Seitenführungsqualität aus Kapitel 8.2 verwendet. Zusätzlich wird die Anzahl der Probanden verglichen, die die



Fahrbahnmarkierung überfahren. Es werden die maximale Querablage und die Zeit bis zum ersten Eingriff des Fahrers untersucht. Darüber hinaus wird für die Bewertung der Bedienkonzepte das Verhältnis der außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Strecke zur Gesamtstrecke während der Fehlfunktion herangezogen.

Neben der Fehlfunktion wurde ein kritisches Szenario eingebaut, um Unterschiede bei der Auflösung unerwartet entstehender Situationen zu überprüfen. Zur Bewertung werden die beiden in Kapitel 8.2 präsentierten Kennwerte maximale Längsverzögerung sowie minimale TTC herangezogen. Darüber hinaus wird die Anzahl entstandener kritischer Situationen beider Bedienkonzepte verglichen.

Um den Einfluss des Bedienkonzepts auf die mentale Beanspruchung der Versuchspersonen bei teilautomatisierter Fahrzeugführung bewerten zu können, wird nach jeder Fahrt der Workload mithilfe des ungewichteten NASA-TLX Fragebogens erhoben (vgl. Kapitel 8.2). Zusätzlich füllen die Probanden den in Kapitel 8.2 beschriebenen Fragebogen zur subjektiven Wahrnehmung der Interaktion sowie zur Usability aus.

Ein abschließender Fragebogen stellt die beiden untersuchten Bedienkonzepte einander gegenüber und ermöglicht den Versuchspersonen die subjektive Bewertung der Interaktion während der Fehlfunktion (vgl. Kapitel 8.2).

10.2 Hypothesen

Im Folgenden werden die zu überprüfenden Hypothesen zum Einfluss des Bedienkonzepts auf die Übernahmequalität sowie auf die Längsführung in einem kritischen Szenario präsentiert. Zusätzlich werden die Hypothesen bezüglich Beanspruchung, Bewertung der Interaktion und Usability sowie zur Wahrnehmung der Fehlfunktion aufgestellt.

Übernahmequalität

Während beim konventionellen Bedienkonzept keine Rückmeldung der Längsführung über das isotonische Stellteil stattfindet, wird beim Yoke eine aktive Rückmeldung der Geschwindigkeit angewendet. Da sich die zugrunde liegenden Prinzipien unterscheiden, kann von einem Einfluss des Bedienkonzepts auf die Qualität der Übernahme ausgegangen werden.

Übernahme_H₀: Das Bedienkonzept beeinflusst bei Fehlfunktion die Qualität der Übernahme nicht.



Übernahme_H₁: Das Bedienkonzept beeinflusst bei Fehlfunktion die Qualität der Übernahme.

Zur Überprüfung dieser Hypothese werden der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Seitenführungsqualität herangezogen. Darüber hinaus findet eine Bewertung basierend auf der maximalen Querablage und der Zeit vom Eintritt der Fehlfunktion bis zum ersten Eingriff statt. Zudem wird eine Auswertung des außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Weges durchgeführt (vgl. Kapitel 8.2). Ein Vergleich der Probandenanzahl, die mit dem jeweiligen Bedienkonzept die Fahrbahnmarkierung überfahren, gibt ebenfalls Aufschluss über den Einfluss des Konzepts auf die Übernahmequalität.

Längsführungsqualität in kritischem Szenario

Da die Automation beim konventionellen Konzept keinen selbstständigen Eingriff in die Längsführung umsetzen kann, muss der Fahrer den haptischen Hinweis am aktiven Fahrpedal wahrnehmen und die Verzögerung selbstständig einleiten. So lässt sich auch bei dem kritischen Szenario ein Einfluss des Bedienkonzepts vermuten.

Längs_H₀: Das Bedienkonzept beeinflusst die Längsführung in einem kritischen Szenario nicht.

Längs_H₁: Das Bedienkonzept beeinflusst die Längsführung in einem kritischen Szenario.

Diese Hypothese wird anhand der in Kapitel 8.2 beschriebenen, maximalen Verzögerung sowie minimalen TTC überprüft. Darüber hinaus findet eine Bewertung der Anzahl entstandener kritischer Situationen statt.

Beanspruchung

Während der Fahrer beim konventionellen Bedienkonzept die Steuerungseingaben zur Führung des Fahrzeugs mit Hand- und Fußstellteilen koordinieren muss, konzentriert sich die Bedienung bei dem Yoke-Konzept auf ein Handstellteil. Durch diesen Unterschied kann eine unterschiedliche subjektive Bewertung der mentalen Beanspruchung angenommen werden.

Beanspruchung_H₀: Das Bedienkonzept hat keinen Einfluss auf die Bewertung der subjektiv empfundenen Beanspruchung.

Beanspruchung_H₁: Das Bedienkonzept hat einen Einfluss auf die Bewertung der subjektiv empfundenen Beanspruchung.

Diese Hypothese wird mithilfe des in Kapitel 8.2 vorgestellten ungewichteten NASA-TLX Fragebogens überprüft.



Interaktion

Da sich die beiden Stellteile grundlegend unterscheiden kann auch von einem Einfluss des Bedienkonzepts auf die subjektive Bewertung der Interaktion sowie der Usability ausgegangen werden.

Interaktion_H₀: Die Bewertung der Interaktion sowie der Usability ist unabhängig vom Bedienkonzept.

Interaktion_H₁: Die Bewertung der Interaktion sowie der Usability ist abhängig vom Bedienkonzept.

Die Überprüfung dieser Hypothese findet anhand des in Kapitel 8.2 beschriebenen Fragebogens statt.

Wahrnehmung der Fehlfunktion

Bei dem Yoke-Konzept findet eine haptische Rückmeldung der Fahrzeuggeschwindigkeit statt. Da die untersuchte Fehlfunktion auch die Längsführung betrifft, kann diese vom Fahrer wahrgenommen werden. Es ist somit von einem Einfluss des Bedienkonzepts auf die subjektive Wahrnehmung der Fehlfunktion auszugehen.

Wahrnehmung_H₀: Die Wahrnehmung von Fehlfunktionen ist unabhängig vom Bedienkonzept.

Wahrnehmung_H₁: Die Wahrnehmung von Fehlfunktionen ist abhängig vom Bedienkonzept.

Auch diese Hypothesenüberprüfung findet auf der Grundlage eines speziell entwickelten Fragebogens statt (vgl. Kapitel 8.2).

Das Signifikanzniveau aller statistischen Testverfahren wird auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ festgelegt.

10.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die objektiven und subjektiven Ergebnisse präsentiert. Diese werden nach den in Kapitel 10.1.4 beschriebenen abhängigen Variablen bewertet.

10.3.1 Objektive Daten

Zunächst wird auf die objektiven Ergebnisse beim Auftreten der Fehlfunktion sowie des kritischen Szenarios eingegangen.



10.3.1.1 Fehlfunktion

Die Zahl der Versuchspersonen, die bei der Fehlfunktion die Fahrstreifenmarkierung überfahren, ist in Tabelle 10.2 dargestellt.

Tabelle 10.2: Anzahl der Probanden mit überfahrener Fahrstreifenmarkierung (N = 44)

Bedienkonzept	Anzahl Probanden
Konventionelles Bedienkonzept	29
Yoke	35
Beide	26

Mithilfe des McNemar-Tests kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf das Überfahren der Fahrbahnmarkierung festgestellt werden. Während mit konventionellem Bedienkonzept 29 Versuchspersonen über die Fahrbahnmarkierung fahren, verlassen mit Yoke 35 Probanden den eigenen Fahrstreifen. 26 der insgesamt 44 Versuchspersonen kommen mit beiden Bedienkonzepten vom Fahrstreifen ab.

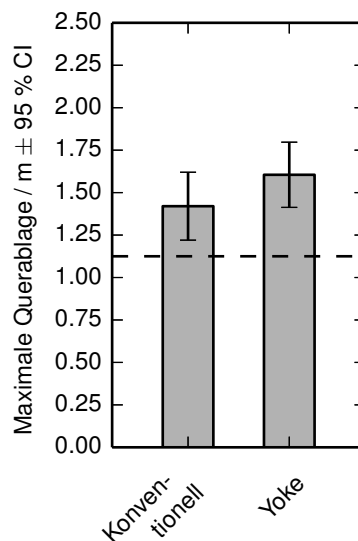


Abbildung 10.6: Mittelwert der maximalen Querablage in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44). Die gestrichelte Linie stellt die Querablage dar, ab der die Fahrbahnmarkierung überfahren wird.

Die maximale Querablage während der Fehlfunktion ist in Abbildung 10.6 dargestellt. Dabei kennzeichnet die gestrichelte Linie die Querablage, ab der die Fahrbahnmarkierung überfahren wird. Es kann mithilfe des t-Tests kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die maximale Querablage festgestellt wer-



den. Somit kommen die Probanden mit beiden Bedienkonzepten im Mittel gleich weit vom Fahrstreifen ab.

Abbildung 10.7 zeigt den Mittelwert sowie die Standardabweichung der Seitenführungsqualität nach Reichart (2000) während der Fehlfunktion. Mithilfe des t-Tests kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die mittlere Seitenführungsqualität nachgewiesen werden. Die mittlere Qualität bei der Bedienung mit konventionellem Konzept ($M = .638$, $SD = .120$) ist signifikant höher als mit Yoke ($M = .583$, $SD = .120$); $t(43) = 2.936$, $p = .005$. So können die Versuchspersonen den Fahrstreifen mit Lenkrad und Pedalerie besser halten als mit dem Yoke.

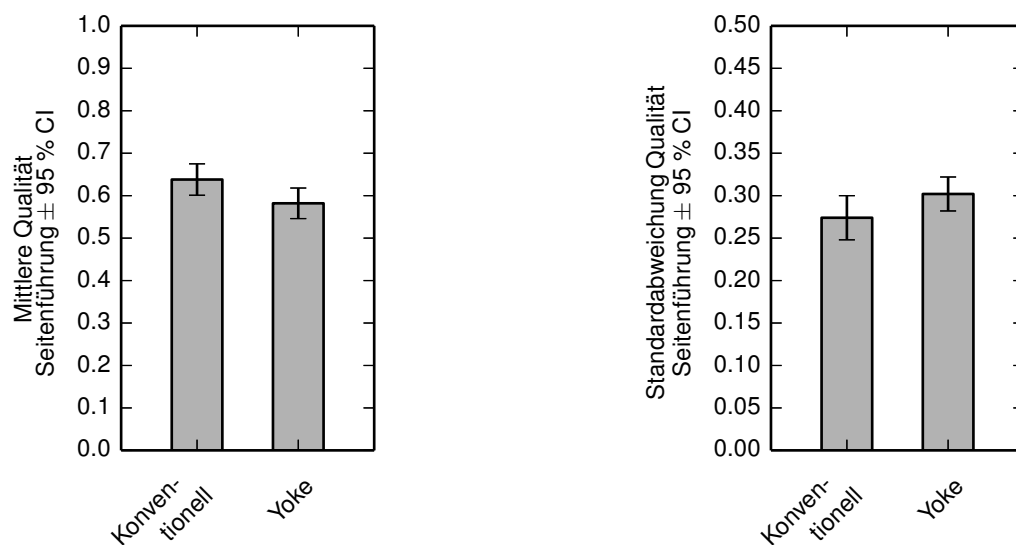


Abbildung 10.7: Mittelwert und Standardabweichung der Seitenführungsqualität in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Darüber hinaus kann auch ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Standardabweichung der Seitenführungsqualität nachgewiesen werden. Die Standardabweichung bei der Fahrzeugführung mit konventionellem Konzept ($M = .274$, $SD = .0850$) ist signifikant geringer als mit Yoke ($MW = .302$, $SD = .065$); $t(43) = 2.449$, $p = .018$. Die Probanden können somit das Fahrzeug beim Auftreten der Fehlfunktion mit konventionellem Konzept ruhiger halten als mit Yoke.

Der außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegte Weg bezogen auf die Gesamtstrecke der Fehlfunktion ist in Abbildung 10.8 dargestellt. Es kann mithilfe des t-Tests kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf den außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Weg nachgewiesen werden.

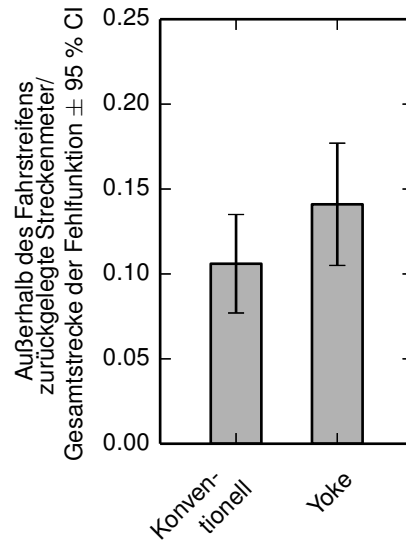


Abbildung 10.8: Verhältnis der außerhalb des Fahrstreifens zurückgelegten Streckenmeter zur Gesamtstrecke der Fehlfunktion in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Die Dauer vom Eintreten der Fehlfunktion bis zum ersten Eingriff des Probanden zeigt Abbildung 10.9. Auch hier kann mithilfe des t-Tests kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Eingriffszeit nachgewiesen werden.

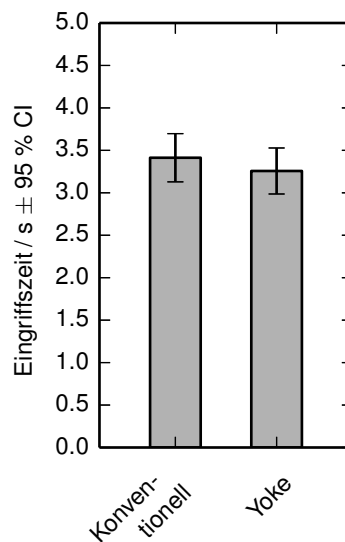


Abbildung 10.9: Eingriffszeit in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)



10.3.1.2 Kritisches Szenario

Für die Auswertung des kritischen Szenarios müssen die Daten von zwei Versuchspersonen ausgeschlossen werden. Bei dem ersten Probanden bleibt die Fehlfunktion der Automation auch nach dem Verlassen des Betrachtungsintervalls erhalten. Somit kann dieser die darauf folgende kritische Situation nicht erreichen. Die zweite Versuchsperson lässt sich beim konventionellen Bedienkonzept weit zurückfallen, sodass ein Verzögern nicht nötig wird und eine kritische Situation nicht entstehen kann. Die folgende Auswertung bezieht sich somit auf ein Probandenkollektiv mit 42 Versuchspersonen.

In Abbildung 10.10 ist die, nach Gleichung 8.3 errechnete, minimale TTC des Betrachtungszeitraums dargestellt. Mithilfe des t-Tests kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ nachgewiesen werden. So ist die Zeit bei Nutzung des konventionellen Konzepts ($M = 4.622$, $SD = 1.241$) signifikant kleiner als mit Yoke ($M = 6.187$, $SD = 0.605$); $t(41) = -7.643$, $p < .001$. Die Probanden verringern die Geschwindigkeit bei der Fahrzeugführung mit Yoke somit schneller als mit Lenkrad und Pedalerie.

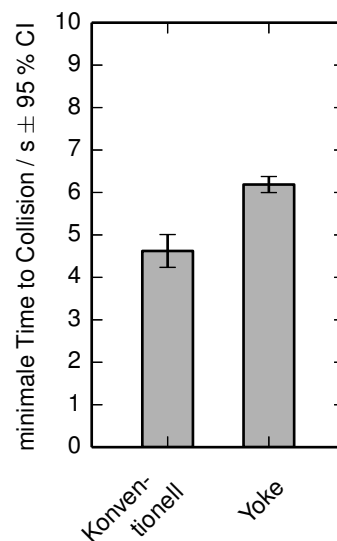


Abbildung 10.10: Minimale TTC in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 42)

Die maximale Verzögerung des Fahrzeugs bei unerwartetem Bremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs ist in Abbildung 10.11 dargestellt. Es kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die maximale Verzögerung nachgewiesen werden.

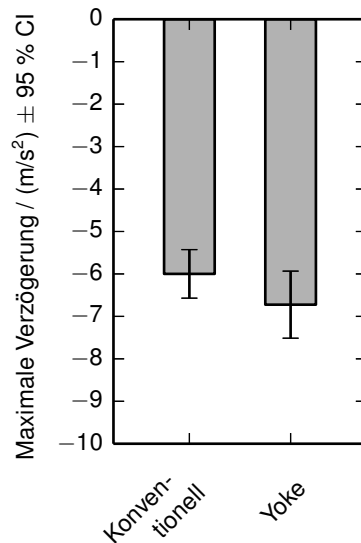


Abbildung 10.11: Maximale Verzögerung in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 42)

Tabelle 10.3 zeigt die Anzahl der Versuchspersonen, die eine kritische Situation nach Neukum et al. (2008) verursachen. Diese ist durch eine Verzögerung mit mehr als 5 m/s² oder eine TTC kleiner als 1,5 s definiert. Mithilfe des McNemar-Tests kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Anzahl der kritischen Situationen festgestellt werden.

Tabelle 10.3: Kritische Situationen

Bedienkonzept	Anzahl Probanden
Konventionelles Bedienkonzept	31
Yoke	25
Beide	19

10.3.2 Subjektive Daten

Für die Bewertung der subjektiven Beanspruchung wird der ungewichtete NASA-TLX Fragebogen ausgewertet. Abbildung 10.12 zeigt die Ergebnisse bezüglich der beiden untersuchten Bedienkonzepte.

Es kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Bewertung der Beanspruchung festgestellt werden. So wird die Bedienung mit konventionellem Konzept (M = 22.443, SD = 11.924) als signifikant beanspruchender bewertet als mit Yoke-Konzept (M = 16.364, SD = 8.836); $t(43) = 3.789$, $p < .001$.

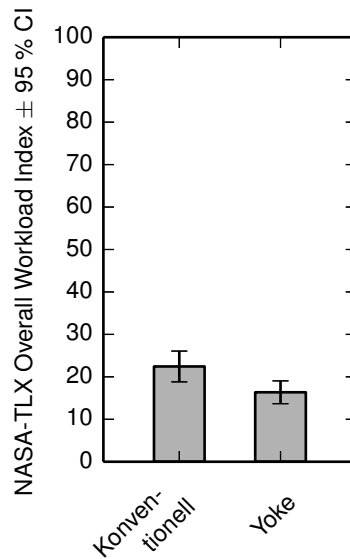
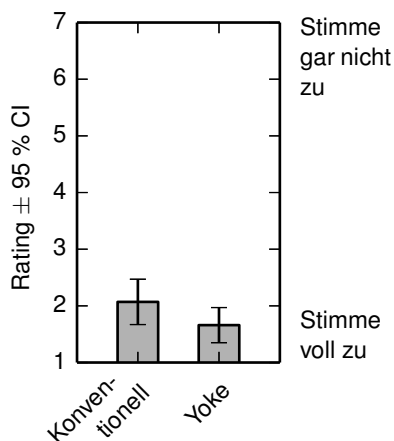


Abbildung 10.12: NASA-TLX Overall Workload Index in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Im Folgenden werden die Aussagen des Fragebogens zur Interaktion und zur Usability beider Bedienkonzepte gegenübergestellt. Da es sich um keinen standardisierten Fragebogen handelt, werden die acht Aussagen einzeln behandelt.

Ich konnte die Automation gut wahrnehmen.



Ich konnte die Signale der Automation gut verstehen.

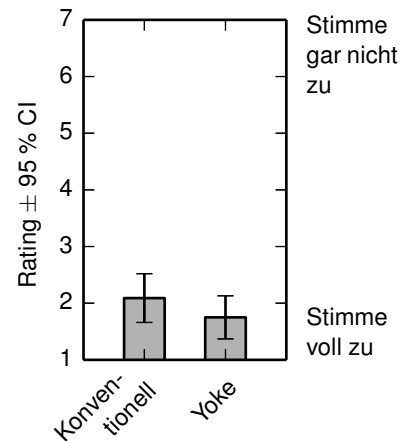


Abbildung 10.13: Mittelwert des Ratings der Fragen 1 und 2 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Es kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Bewertung der Wahrnehmbarkeit der Automation festgestellt werden (s. Abbildung 10.13 links). So können die Versuchspersonen die Automation beim konventionellen Konzept



($M = 2.07$, $SD = 1.301$) subjektiv schlechter wahrnehmen als beim Konzept mit dem Yoke ($M = 1.66$, $SD = 1.033$); $t(43) = 2.248$, $p = .030$.

Es kann auch ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Bewertung der Verstehbarkeit der Automationsrückmeldung festgestellt werden (s. Abbildung 10.13 rechts). Die Probanden haben beim konventionellen Konzept ($M = 2.09$, $SD = 1.428$) den subjektiven Eindruck, die Automation schlechter zu verstehen als mit dem Yoke ($M = 1.75$, $SD = 1.241$); $t(43) = 2.020$, $p = .050$.

Jedoch kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Bewertung der dritten Frage festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.14 links). Die Versuchspersonen bewerten den subjektiven Eindruck, gegen die Automation arbeiten zu müssen, unabhängig vom Bedienkonzept gleich.

Es kann auch kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Bewertung des subjektiven Sicherheitsgefühls festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.14 rechts). So bewerten die Versuchspersonen ihr Gefühl der Sicherheit unabhängig vom Bedienkonzept gleich.

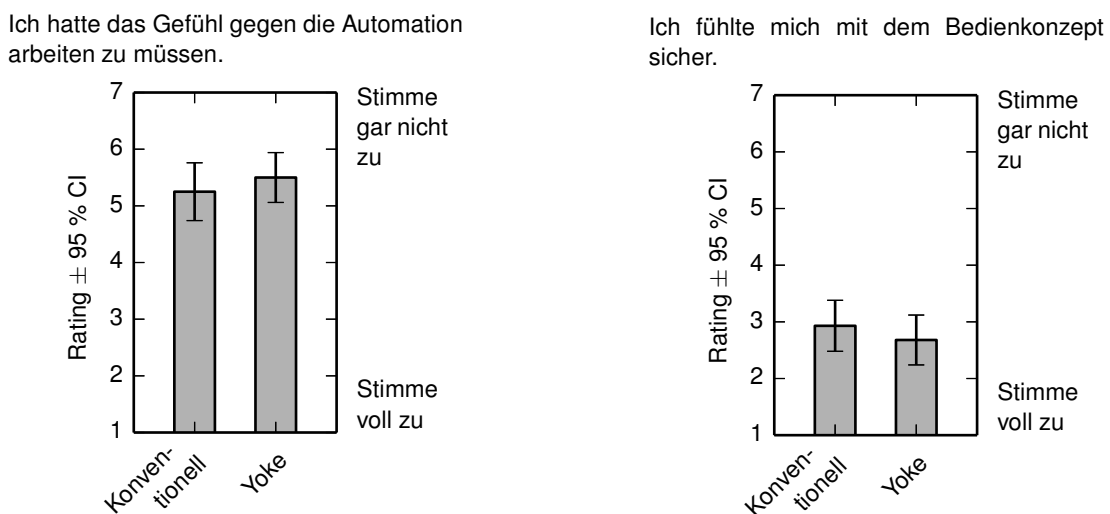
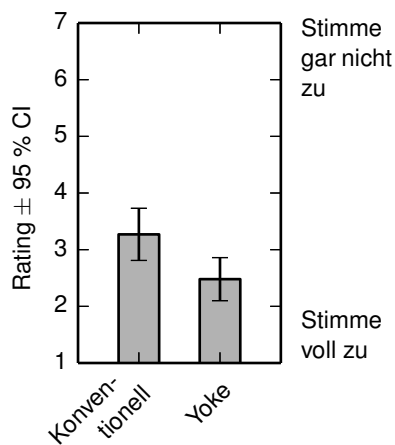


Abbildung 10.14: Mittelwert des Ratings der Fragen 3 und 4 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Allerdings kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung des Wohlbefindens festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.15 links). So fühlen sich die Versuchspersonen mit Yoke-Bedienkonzept ($M = 2.48$, $SD = 1.248$) wohler als mit konventionellem Konzept ($M = 3.27$, $SD = 1.515$); $t(43) = 3.342$, $p = .002$.



Ich fühlte mich mit dem Bedienkonzept wohl.



Ich bin gerne mit dem Bedienkonzept gefahren.

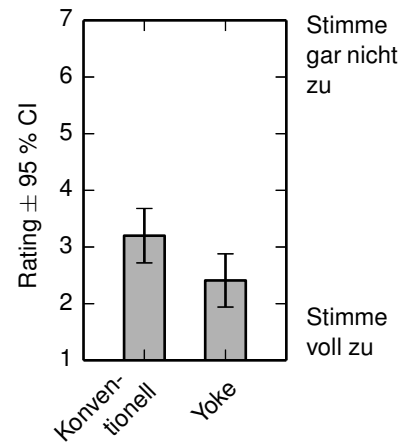


Abbildung 10.15: Mittelwert des Ratings der Fragen 5 und 6 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

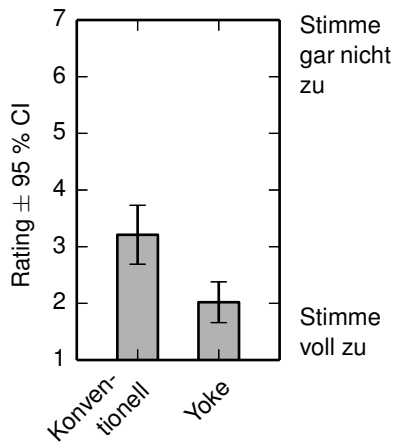
Es kann auch ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung der sechsten Frage festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.15 rechts). So bewerten die Probanden ihr Gefallen am Yoke-Konzept ($M = 2.41$, $SD = 1.545$) höher als am konventionellen Konzept ($M = 3.20$, $SD = 1.608$); $t(43) = 2.872$, $p = .006$.

Es kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung des Funktionsumfangs festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.16 links). Dabei wird das konventionelle Konzept ($M = 3.21$, $SD = 1.592$) signifikant schlechter bewertet als das Konzept mit Yoke ($M = 2.03$, $SD = 1.181$); $t(38) = 4.690$, $p < .001$.

Darüber hinaus kann ein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung der Bedienung festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.16 rechts). So wird das Konzept mit Yoke ($M = 2.00$, $SD = 1.201$) als leichter bedienbar bewertet als das konventionelle Konzept ($M = 2.66$, $SD = 1.446$); $t(43) = 2.663$, $p = .011$.



Das Bedienkonzept hat alle Funktionen und Fähigkeiten, die ich von ihm erwarte.



Insgesamt bin ich zufrieden, wie leicht das Fahrzeug mit dem Bedienkonzept zu bedienen ist.

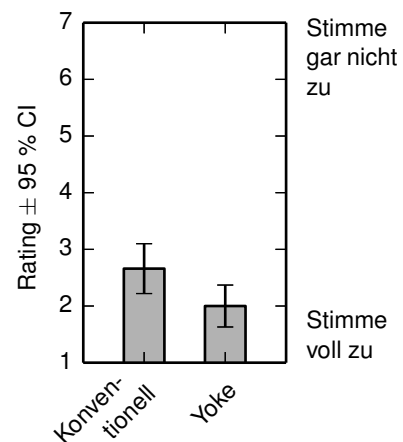
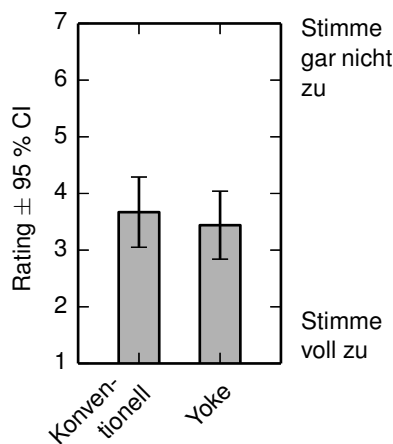


Abbildung 10.16: Mittelwert des Ratings der Fragen 7 und 8 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 44)

Der Fragebogen zur Fehlfunktion stellt die beiden Konzepte einander direkt gegenüber und trifft gezielte Aussagen, um den Grad der Zustimmung der Versuchspersonen zu erheben. Im Folgenden werden die subjektiven Bewertungen der vier Aussagen getrennt behandelt.

Ich habe die Fehlfunktion schnell wahrgenommen.



Ich konnte die Fehlfunktion schnell identifizieren.

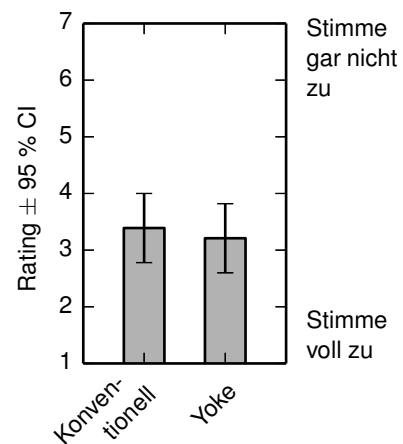


Abbildung 10.17: Mittelwert des Ratings zur Fehlfunktion der Fragen 1 und 2 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 42)

Es kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung der Wahrnehmung der Fehlfunktion festgestellt werden. So nehmen die

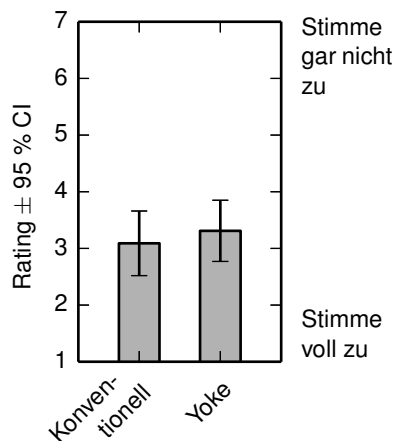


Versuchspersonen die Fehlfunktion bei beiden Konzepten subjektiv gleich schnell wahr (vgl. Abbildung 10.17 links).

Auch auf die subjektive Bewertung, wie schnell die Probanden die Fehlfunktion identifizieren können, kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ festgestellt werden (vgl. Abbildung 10.17 rechts).

Es kann kein signifikanter Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die subjektive Bewertung der Fragen drei und vier festgestellt werden. So bewerten die Versuchspersonen sowohl die Geschwindigkeit, mit der sie die Fehlfunktion korrigieren, als auch die Qualität ihrer Korrektur unabhängig vom Bedienkonzept gleich (vgl. Abbildung 10.18).

Ich konnte die Fehlfunktion schnell korrigieren.



Ich konnte die Fehlfunktion gut korrigieren.

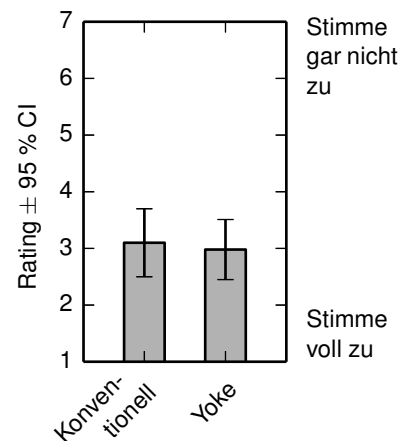


Abbildung 10.18: Mittelwert des Ratings zur Fehlfunktion der Fragen 3 und 4 in Abhängigkeit des Faktors „Bedienkonzept“ (N = 41; N = 39)

Zum Abschluss des Versuchs werden die Probanden nach dem präferierten Bedienkonzept für die kooperative Fahrzeugführung gefragt. Bei dieser Umfrage enthält sich ein Proband, 14 Versuchspersonen stimmen für das konventionelle Bedienkonzept und 29 Probanden für das Yoke-Konzept.



10.4 Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion

Die Ergebnisse aus Kapitel 10.3 zeigen deutliche Unterschiede der beiden Bedienkonzepte sowohl in der subjektiven Bewertung als auch den objektiven Kennwerten. So kann die Nullhypothese (Übernahme_ H_0), die keinen Einfluss des Faktors „Bedienkonzept“ auf die Fahrzeugführung bei einer Fehlfunktion der Automation postuliert, verworfen werden. Zwar ist weder ein Einfluss des Konzepts auf die Anzahl der Probanden, die den Fahrstreifen verlassen, noch auf die maximale Querablage erkennbar, jedoch zeigen sich signifikante Unterschiede in der Seitenführungsqualität. Sowohl deren Mittelwert als auch deren Standardabweichung liefern beim konventionellen Konzept signifikant bessere Ergebnisse. Das bedeutet, dass die Versuchspersonen das Fahrzeug während der Fehlfunktion mit Lenkrad und Pedalen weiter in der Mitte des Fahrstreifens halten können. Auch die gefahrenen Trajektorien sind insgesamt ruhiger als mit alternativem Konzept. Diese Ergebnisse sind vermutlich auf die fehlende Erfahrung und Übung im Umgang mit dem Yoke zurückzuführen. Da die Versuchspersonen ca. zehn Minuten lang keine Steuereingabe tätigen müssen, bevor die Fehlfunktion auftritt, ist ein schlechteres Abschneiden des alternativen Bedienkonzepts verständlich. Im Fall mangelnder Erfahrung müssten sich die Fahrer erst darüber bewusst werden, wie sie bei diesem Konzept in die Fahrzeugführung eingreifen können. Bezüglich des zurückgelegten Weges außerhalb des Fahrstreifens und der Zeit bis zum ersten Eingriff lässt sich allerdings kein Unterschied der beiden Konzepte nachweisen.

Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse fällt die hohe Anzahl der Probanden auf, die bei der Fehlfunktion den Fahrstreifen verlassen. Hier zeigt sich deutlich, wie schnell die Versuchspersonen ihre Überwachungsaufgabe vernachlässigen. Bereits nach ca. 13 Minuten sinkt die Aufmerksamkeit offensichtlich so drastisch ab, dass ca. 66 Prozent der Probanden nicht mehr rechtzeitig in die Querführung eingreifen, um das Abkommen vom Fahrstreifen zu verhindern. Besonders dramatisch erscheint die Zahl der Probanden, die sowohl beim ersten als auch beim zweiten Durchgang das Verlassen nicht aufhalten können. So verlassen fast 60 Prozent der Versuchspersonen bei beiden Durchgängen den Fahrstreifen.

Auch die maximale Querablage während der Fehlfunktion zeigt schwerwiegende Ausmaße. So taucht die Kante des Fahrzeugs beim Yoke im Mittel bis zu 47,5 Zentimeter und beim konventionellen Konzept bis zu 29,5 Zentimeter in den benachbarten Fahrstreifen ein. Dies lässt sich durch die Zeit bis zum ersten Eingriff erklären. So benötigen die Versuchspersonen im Mittel 3,3 Sekunden, um die Fehlfunktion



wahrzunehmen, die Entscheidung zum Eingriff zu fällen und das Gegensteuern einzuleiten. Bei einer Betrachtung dieser Zahlen vor dem Hintergrund der teil- oder sogar hochautomatisierten Fahrzeugführung, bei der der Fahrer nur visuell überwachen muss und nicht mehr haptisch über das Lenkrad mit dem Fahrzeug und der Automation interagiert, lässt sich eine weitere Verschlechterung der Übernahmegüte vermuten. Im Gegensatz zum durchgeführten Versuch im statischen Fahrsimulator gewinnt der Fahrer im Realfahrzeug zwar einen kinästhetischen Eindruck, jedoch würde auch hier die Querschleunigung im Fall der untersuchten Fehlfunktion ausbleiben. Dieser Tatsache könnte sich der Fahrer nur bewusst werden, wenn er die Umgebung beobachten und die Kurve wahrnehmen würde.

Bei einer Versuchsperson kann ein Fall von „Misuse“ festgestellt werden (vgl. Parasuraman & Riley, 1997). So hängt der Proband die rechte Hand an die Speiche des Lenkrads und erzeugt ein dauerhaftes Moment in Richtung des rechten Fahrstreifenrandes. Dadurch kann er das durch die Automation aufgebrachte Gegenmoment fortwährend wahrnehmen und die Funktion der Automation auf Kosten der Seitenführungsqualität durchgehend überwachen.

Die Auswertung des kritischen Szenarios zeigt ebenfalls Unterschiede zwischen den Bedienkonzepten, sodass die Nullhypothese ($L\ddot{a}ngs_H_0$) verworfen werden kann. Während bei der maximalen Verzögerung kein Einfluss der Konzepte festgestellt werden kann, unterscheiden sie sich bezüglich der minimalen TTC signifikant. Das Yoke zeigt eine höhere TTC als das konventionelle Konzept, jedoch liegt die Zeit bis zur Kollision mit über vier Sekunden auch beim konventionellen Bedienkonzept außerhalb des Kriteriums für kritische Situationen nach Neukum et al. (2008). Die besseren Ergebnisse des alternativen Bedienkonzepts können mit dem direkten Eingriff der Automation in die Längsführung begründet werden. Beim konventionellen Konzept hingegen muss der Fahrer das Entgegenfahren des Druckpunktes wahrnehmen und den Fuß auf das Bremspedal umsetzen, bevor der Bremsvorgang eingeleitet werden kann. Die daraus entstehende Totzeit sorgt für den stärkeren Abfall in der TTC gegenüber dem alternativen Bedienkonzept.

Insgesamt zeigen sich unabhängig vom verwendeten Bedienkonzept eine hohe Anzahl auftretender, kritischer Situationen, die hauptsächlich auf starke Verzögerungen zurückzuführen sind. Durch die fehlende kinästhetische Rückmeldung können die Versuchspersonen die Beschleunigungen möglicherweise schwer einschätzen und verursachen somit Abbremsvorgänge, die weit außerhalb des Komfortbereichs nach Heißing und Ersoy (2007) liegen. Um eine angenehmere Fahrt zu gewährleisten, würde der Fahrer in einem dynamischen Fahrsimulator oder in einem Real-



fahrzeug vermutlich eine kleinere TTC zugunsten einer geringeren Verzögerung in Kauf nehmen.

Um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der beiden Bedienkonzepte zu vergleichen, wird von den Versuchspersonen ein ungewichteter NASA-TLX Fragebogen ausgefüllt. Dabei kann eine geringer bewertete Beanspruchung der Probanden beim Yoke-Konzept statistisch nachgewiesen und somit die Nullhypothese (Beanspruchung_ H_0) verworfen werden.

Da die Automation beim Yoke-Konzept von den Versuchspersonen als besser wahrnehmbar bewertet wird, kann die Alternativhypothese (Interaktion_ H_1) bezüglich der Interaktion angenommen werden. Zurückzuführen ist diese Tatsache auf das Webersche Gesetz, das die Zunahme der Unterschiedsschwelle bei steigendem Ausgangsreiz voraussagt (vgl. Fechner, 1860). Da die isomorphen Pedale im Gegensatz zum Yoke-Konzept abhängig vom Auslenkwinkel eine Fußkraft voraussetzen, ist die Kraftänderung durch den Druckpunkt schlechter wahrnehmbar. So verbalisieren einige Versuchspersonen ihre Schwierigkeiten, das Entfernen des Druckpunkts zu bemerken. Sie geben an, durch regelmäßiges Antippen des Fahrpedals dessen Position zu überprüfen.

Auch die Verständlichkeit der Automation beim Yoke-Konzept wird im Vergleich zum konventionellen Bedienkonzept besser bewertet. Da die Intention der Automation beim konventionellen Bedienkonzept sowohl beim Zurücknehmen der Fahrpedalstellung als auch beim aktiven Bremsvorgang in einer Bewegung des Druckpunktes dem Fahrer entgegen resultiert, ist die Identifizierung nicht eindeutig. Um die Absicht der Automation zu verstehen und entsprechend zu reagieren, muss der Fahrer einen Bezug zur Umwelt herstellen, z. B. den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug überprüfen und bei starker Annäherung das Bremspedal betätigen.

Die subjektive Bewertung der Usability zeigt ebenfalls Unterschiede bezüglich des Bedienkonzepts. So geben die Versuchspersonen an, sich mit dem Yoke-Bedienkonzept wohler zu fühlen. Darüber hinaus stufen sie ihr Gefallen am Yoke-Konzept als höher ein.

Die fehlende Fähigkeit der Automation, einen Verzögerungsvorgang selbstständig durchzuführen, wird von vielen Versuchspersonen bemängelt. So bewerten sie den Funktionsumfang beim konventionellen Bedienkonzept schlechter als mit Yoke. Auch die subjektive Bewertung über den Schwierigkeitsgrad der Bedienbarkeit leidet unter diesem Defizit, da im Fall des konventionellen Bedienkonzepts ein aktiver Eingriff des Fahrers durchgehend nötig ist.



10.4 Hypothesenüberprüfung und Versuchsdiskussion

Die Befragung über die Fehlfunktion ergibt keinen Einfluss des Bedienkonzepts auf deren subjektive Wahrnehmung. So kann die zugehörige Nullhypothese (Wahrnehmung_ H_0) angenommen werden. Die Dauer bis zur Erkennung und zur Identifizierung der Fehlfunktion wird subjektiv gleich bewertet. Auch in Bezug auf die Geschwindigkeit und Qualität der Korrektur wird von den Versuchspersonen subjektiv kein Unterschied festgestellt.



11 Zusammenfassung und Diskussion

Seit der Entwicklung des elektronischen Antiblockiersystems im Jahr 1978 lässt sich auf dem Gebiet der Fahrerassistenz ein rasanter Fortschritt feststellen. Zunächst auf Sicherheit bedacht, wurden technische Systeme entwickelt, die unter gewissen Umständen aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, um die Stabilität der Regelstrecke Kraftfahrzeug zu jedem Zeitpunkt zu erhalten. Mit Beginn des 21. Jahrhunderts trat jedoch der Gedanke des Komforts bei den Automobilherstellern zunehmend in den Vordergrund. So werden seitdem zahlreiche Assistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer entlasten, indem sie Teile der Fahraufgabe übernehmen. Getrieben von dem Ziel der autonom fahrenden Kraftfahrzeuge fokussieren sich die Bemühungen der Hersteller in den letzten Jahren auf die Erforschung und Entwicklung von Technologien, die das Fahrzeug dazu befähigen, sich selbstständig in der Umgebung zurechtzufinden und eigenständig Entscheidungen zu treffen (Rauch et al., 2012). Bis jedoch die große Zukunftsvision des autonomen Fahrzeugs umsetzbar sein wird, werden zunächst Systeme auf dem Markt Einzug halten, die nur klar definierte Szenarien beherrschen und auf den Fahrer als Rückfallebene angewiesen sind. Dieser muss dazu die Automation dauerhaft überwachen und jederzeit in der Lage sein, die Fahraufgabe zu übernehmen. Es wird somit ein Wandel der Rolle des Fahrers von einer aktiven Fahrzeugführung hin zu einer Überwachung der Automation stattfinden.

Die zunehmende Automatisierung kann jedoch, wie sich in der Luftfahrt gezeigt hat, negative Effekte mit sich bringen. So birgt eine monotone Überwachungsaufgabe die Gefahr, dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit reduziert (vgl. Buld et al., 2002). Dadurch kann es vorkommen, dass er nicht mehr zu jedem Zeitpunkt in der Lage ist, die Fahraufgabe zu erfüllen. Während ihm bei der Annäherung an eine Systemgrenze ausreichend Zeit zur Übernahme gewährt werden kann, muss der Fahrer im Fall eines Ausfalls oder einer Fehlfunktion unvorbereitet und vor allem schnell in die Fahrzeugführung eingreifen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Fahrer den Systemzustand zunächst erkennen und sich ein Bild der Verkehrssituation verschaffen



muss, bevor er richtig handeln kann. Je mehr notwendige Informationen dem Fahrer zum Zeitpunkt der Übernahme zur Verfügung stehen, umso schneller kann er die Fahraufgabe erfüllen. Der Schlüssel zu einer schnellen Übernahme der Fahrzeugführung liegt somit darin, ein ausreichendes Situationsbewusstsein des Fahrers zu erhalten, indem er auf angemessene Weise im Regelkreis der Fahrzeugführung gehalten wird (vgl. Endsley & Kiris, 1995).

Eine Lösung dieses Problems bietet der Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung, bei der der Fahrer und die Automation die Fahraufgabe gleichzeitig wahrnehmen. Durch eine kontinuierliche Interaktion zwischen den beiden Agenten wird eine Involvierung des Fahrers gewährleistet. Die Grundlage des Informationsaustausches bildet die haptische Kopplung am Bedienelement, durch die der Fahrer die Handlungen der Automation wahrnehmen und durch deren Ausbleiben er auf einen Ausfall oder eine Fehlfunktion schließen kann. Darüber hinaus kann er verzögerungsfrei auf das Fahrzeug Einfluss nehmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei alternative Bedienkonzepte für die manuelle sowie kooperative Fahrzeugführung entwickelt und auf ihre Tauglichkeit überprüft. Um eine Interaktion zwischen dem Fahrer und der Automation zu ermöglichen, wurden vier Konzepte auf der Basis aktiver Stellteile umgesetzt. In einer ersten Versuchsreihe mit 24 Probanden stellte sich das Yoke-Konzept bei der manuellen Fahrzeugführung als vielversprechende Alternative heraus. Dieses Stellteil besitzt einen rotatorischen und einen translatorischen Freiheitsgrad, um den beiden Dimensionen der Fahrzeugführung zu entsprechen. Während durch Ziehen und Drücken des Lenkrads die Längsführung des Fahrzeugs manipuliert werden kann, wird durch die Rotation der Lenkwinkel verändert.

Da diese Untersuchung im statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München stattfand, ist anzumerken, dass keine Aussage über den Einfluss von Beschleunigungen oder Schwingungen auf die Qualität der Fahrzeugführung getroffen werden kann. Darüber hinaus können die Absolutwerte der Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf die Realität übertragen werden. Zum einen ist die Regelleistung des Fahrers durch das Fehlen der vestibulären und kinästhetischen Rückmeldung des Regelstreckenverhaltens beeinträchtigt (vgl. Hosman & Van der Vaart, 1981). Zum anderen kann eine Rückkoppelung der durch die Beschleunigung entstehenden Kräfte an den Bedienelementen nicht ausgeschlossen werden. Vorangegangene Versuche mit Sidestick unter dynamischen Bedingungen zeigten jedoch, dass die beim Fahren entstehenden Beschleunigungen selbst bei kraftempfindlichen Bedienkonzepten keinen Einfluss ausüben (Kienle et al., 2013). So kann davon ausgegangen werden, dass die entstehenden Kräfte durch den Fahrer ausgeglichen werden.



In einer zweiten Versuchsreihe mit 44 Probanden wurde die kooperative Fahrzeugführung adressiert. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchung in der Erkennung und Identifizierung einer Fehlfunktion und in der Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer. Auf einer Autobahn mit drei Fahrstreifen fielen sowohl die Längs- als auch die Querführung vor einer Kurve aus und erzeugten ein Abdriften auf den seitlichen Verkehr und ein Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug. Um den ungünstigsten Fall untersuchen zu können, wurde den Probanden mitgeteilt, dass die Automation die Fahrzeugführung vollständig übernehme und sie nur, wie für die Teilautomation definiert, einer Überwachungsaufgabe nachkommen müssten. Allerdings wurden sie explizit ermutigt, jederzeit in die Fahrzeugführung einzugreifen, sobald sie dies für notwendig erachteten. Es stellte sich das Yoke-Konzept gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept als signifikant schlechter heraus. Diese Tatsache lässt sich vermutlich auf die geringe Übung der Probanden im Umgang mit dem Yoke zurückführen. Da die Fehlfunktion erst nach etwa zehn Minuten eintrat, mussten sich die Versuchspersonen im Gegensatz zum konventionellen Bedienkonzept zunächst wieder darüber bewusst werden, wie der Eingriff durchzuführen wäre. Während die Versuchspersonen bei der Bedienung des konventionellen Konzepts auf jahrelange Erfahrung zurückgreifen konnten, waren die trainierten Handlungsmuster für das Yoke-Konzept nur bedingt anwendbar.

Da auch diese Untersuchung im statischen Fahrsimulator stattfand, sind die Absolutwerte der Ergebnisse entsprechend zu interpretieren. Die bei der Fehlfunktion auftretenden hohen Querablagen lassen darauf schließen, dass die Versuchspersonen wahrnahmen, sich in einer virtuellen Umgebung zu bewegen. Sie waren sich anscheinend bewusst, zu keinem Zeitpunkt einer Gefahr ausgesetzt zu sein, und vernachlässigten möglicherweise dadurch bereits frühzeitig ihre Überwachungsaufgabe. Wahrscheinlich erkannten die Probanden die aufgetretene Fehlfunktion durch eine reduzierte Aufmerksamkeit später und übernahmen somit erst nach einiger Zeit die Fahraufgabe. Dies resultierte in einer hohen Querablage, die unter realen Bedingungen und einer tatsächlichen Gefährdung voraussichtlich geringer ausfiel.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass das entwickelte Bedienkonzept auf Basis des aktiven Yoke-Stellteils eine Alternative zum konventionellen Konzept darstellt. Auch wenn die Ergebnisse zur Übernahme bei einer Fehlfunktion mit Yoke schlechter ausfallen, sollte dieses Konzept weiter erforscht werden. Da sich diese Resultate vermutlich durch die fehlende Übung der Versuchspersonen erklären lassen, sollte die durchgeführte Untersuchung mit einer längeren Eingewöhnung des Yoke-Konzepts und dadurch verbesserter Vergleichbarkeit wiederholt werden. Darüber hinaus sollte eine Versuchsreihe in einem dynamischen Fahrsimulator oder



im Realfahrzeug durchgeführt werden, um den Einfluss von Beschleunigungen auf die Qualität der Fahrzeugführung beim Yoke-Konzept sicher ausschließen zu können.

Auch wenn quantitative Rückschlüsse der Ergebnisse auf das reale Fahrverhalten nicht möglich sind, lassen sich daraus dennoch Folgerungen ableiten. Insgesamt zeigte sich im Fahrsimulator bei der Fehlfunktion der Teilautomation ein besorgniserregendes Verhalten der Probanden. So begannen einige bereits frühzeitig, ihre Überwachungsaufgabe zu vernachlässigen. Bei einer realen Autofahrt fände der Rückzug des Fahrers zwar langsamer statt, jedoch ist damit zu rechnen, dass durch die längeren Fahrzeiten, im Vergleich zum Versuch, ebenfalls eine Verringerung der Aufmerksamkeit einträte. Auch in der Realität wären ein spätes Eingreifen des Fahrers in die Fahrzeugführung und ein vermehrtes Verursachen gefährlicher Situationen die Folgen.

Sollte sich diese Problematik auch im realen Straßenverkehr zeigen, ließen sich zur Entschärfung, neben der vorausgesetzten hohen Zuverlässigkeit der Automation, zwei Strategien ableiten. Zum einen sollte durch geeignete Maßnahmen verhindert werden, dass sich der Fahrer seiner Aufgabe vollständig entzieht. Der Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung, bei dem Fahrer und Automation die Fahraufgabe gemeinsam bewältigen, könnte zur Lösung dieses Problems herangezogen werden, wobei die Fahrzeugführung nur zu einem gewissen Grad durch die Automation erfüllt werden sollte. Würde die Fahraufgabe ohne Zutun des Fahrers nur unzureichend durchgeführt, müsste der Fahrer im Regelkreis bleiben und könnte sich so seiner Verantwortung nicht vollständig entziehen. Zum anderen sollten Lösungen gefunden werden, um die zukünftigen Handlungen der Automation frühzeitig zu kommunizieren. Durch eine Komplementierung des Bedienkonzepts mit einer Anzeige, die das geplante Vorgehen der Automation visualisiert, könnte die Kommunikation zwischen dem Fahrer und der Automation verbessert werden. So könnte dem Fahrer beispielsweise durch die Darstellung der geplanten Fahrzeugtrajektorie mithilfe eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fall eines Konfliktes Zeit verschafft werden, um die Entscheidung über ein mögliches Eingreifen zu fällen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Im Fall der untersuchten Fehlfunktion hätte die Trajektorie bereits vorzeitig das Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn anzeigen können und somit die Übernahme durch den Fahrer unterstützt.



Literaturverzeichnis

- Alemdar, T. (2009). *Evaluierung der Bedienqualität unterschiedlicher Stellteile unter dem Einfluss von Fahrzeugschwingungen*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19 (6), 775–779.
- Bartels, A., Steinmeyer, S., Brosig, S. & Spichalsky, C. (2012). Fahrstreifenwechselassistenten. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 562–571). Vieweg+Teubner.
- Bengler, K. & Flemisch, F. O. (2011). Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung: Grundlegende ergonomische Fragestellungen. *Mensch + Fahrzeug. Zukunft der Fahrzeugführung kooperativ oder autonom?*
- Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M. & Damböck, D. (2012). Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. *it - Information Technology*, 54 (4), 157–164.
- Benz, S. (2004). *Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil*. Dissertation an der Universität Karlsruhe.
- Berger, C. & Rumpe, B. (2008). Autonomes Fahren - Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge (Autonomous Driving-Insights from the DARPA Urban Challenge). *it - Information Technology*, 50 (4/2008), 258–264.
- Bernotat, R. (1970). Plenary Session: Operation Functions in Vehicle Control Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*, 13 (3), 353–377.
- Bertone & SKF. (2001). *Filo-Präsentations-CD*. (zitiert nach Huang, 2004)
- Bidwell, J. B. (1959). Vehicles and Drivers - 1980. *SAE Technical Paper 590196*. (zitiert nach Eckstein, 2001)
- Biester, L. (2004). Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug / Application of cooperation between human and machine in cars. *VDI-Berichte* (1864).



- Boller, H. E. & Krüger, W. (1978). *Untersuchung eines Bedienelements mit Kräfteingabe und Wegrückmeldung bei der manuellen Lenkung von Unterwasserfahrzeugen*. Forschungsinstitut für Anthropotechnik.
- Bolte, U. (1991). *Das Aktive Stellteil - ein ergonomische Bedienkonzept*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Bosch GmbH. (2014). *Sicher bremsen - mit dem Antiblockiersystem ABS*. (http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/media/de/specials/abs/pdf_1/abs_brochure_de.pdf)
- Bränneby, P., Palmgren, B., Isaksson, A., Petterson, T. & Franzén, S. (1991). Improved active and passive safety by using active lateral dynamic control and an unconventional steering unit. In *13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles* (Bd. 1, S. 224–230). (zitiert nach Eckstein, 2001)
- Bubb, H. (1975). *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Bubb, H. (1977). *Ergonomie des Mensch-Maschine-Systems*. Habilitation an der Technischen Universität München.
- Bubb, H. (1985). Arbeitsplatz Fahrer. Eine ergonomische Studie. *Automobil-Industrie*, 30 (3).
- Bubb, H. (1992). *Menschliche Zuverlässigkeit*. EcoMed.
- Bubb, H. (2002). Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 48 (1).
- Bubb, H. (2003). Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? *VDI-Berichte*, 25–44.
- Buld, S., Krüger, H. P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H. & Totzke, I. (2002). Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. *Abschlussbericht BMBF*.
- Cohen, J. (1969). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic Press.
- Daimler. (1996). *Die Forschungsfahrzeuge von Mercedes-Benz - F 200 Imagination (1996)*. (<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1276316-49-1276333-1-0-0-1320821-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>)



- Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme*. Dissertation an der Technische Universität München.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1987). *DIN 33408-1 - Körperumriss-schablonen für Sitzplätze*.
- Donges, E. (1978). Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 24 (3).
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27 (2).
- Donges, E. (2012). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 15–23). Vieweg+ Teubner.
- Dörner, K., Hipp, E. & Schwertberger, W. (2012). Bahnführungsassistenz für Nutzfahrzeuge. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 582–598). Vieweg+ Teubner.
- Eckstein, L. (2001). *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks (Bd. Reihe 12 Nr. 471)*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- eCoMove. (2010). (<http://www.ecomove-project.eu>)
- Endsley, M. R. (1987). The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Bd. 31, S. 1388–1392). (zitiert nach Endsley, 1999)
- Endsley, M. R. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42 (3), 462–492.
- Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (2), 381–394.
- Europäische Kommission. (2001). *Weissbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft*. Brüssel.
- Europäische Kommission. (2011). *Weissbuch - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. Brüssel.



- Fechner, T. G. (1860). *Elemente der Psychophysik* (Bd. 1). Leipzig, Breitkopf & Härtel.
- Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T. & Schutte, P. C. (2003). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (Bericht). TM-2003-212672, 2003/1.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A. & Schindler, J. (2008). Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. *Human Factors for Assistance and Automation*.
- Franz, B., Kauer, M., Bruder, R. & Geyer, S. (2012). pieDrive – A New Driver Vehicle Interaction Concept for Maneuver-Based Driving. In *Ieee intelligent vehicles symposium workshops (iv), alcala de henares (spain)*.
- Gasser, T. M. (2012). Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *TÜV SÜD Akademie GmbH (Ed.)*, 5.
- Gayko, J. (2012). Lane Keeping Support. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 554–561). Vieweg+ Teubner.
- Geduld, G. (2012). Lidarsensorik. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 172–186). Vieweg+ Teubner.
- Geiser, G. (1985). Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. *ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift*, 87 (2), 77–84.
- Geyer, S. (2013). *Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung*. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt.
- Gibbs, C. B. (1954). The continuous regulation of skilled responses by kinaesthetic feedback. *British Journal of Medical Psychology*, 45, 24–39.
- Gillet, G. (1999). *Ergonomische Optimierung eines aktiven Stellteils: Untersuchung zur Quantifizierung leistungsbeeinflussender Faktoren im Mensch-Maschine-System mit haptischer Rückmeldung*. Herbert Utz Verlag.
- Gold, C., Damböck, D., Bengler, K. & Lorenz, L. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. *TÜV SÜD Akademie GmbH*.



- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L. & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Bd. 57, S. 1938–1942).
- Griffin, B. N., Lewin, J. L. & Louviere, A. J. (1978). The influence of zero-G and acceleration on the human factors of spacecraft design. NASA. (zitiert nach Krist, 1994)
- Gründl, M. (2005). *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation an der Universität Regensburg.
- Hakuli, S., Bruder, R., Flemisch, F., Löper, C., Rausch, H., Schreiber, M. & Winner, H. (2012). Kooperative Automation. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 641–650). Vieweg+ Teubner.
- Hale, A. R., Stoop, J. & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, 33 (10-11), 1377–1387.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139–183.
- Heiing, B. & Ersoy, M. (2007). *Fahrwerkhandbuch*. Vieweg+ Teubner.
- Herzog, J. H. (1968). Manual Control Using the Matched Manipulator Control Technique. *Man-Machine Systems, IEEE Transactions on*, 9 (3), 56–60.
- Herzog, J. H. (1969). *Proprioceptive cues and their influence on operator performance in manual control* (Bd. 1248). NASA. (zitiert nach Eckstein, 2001)
- Hosman, R. J. & Van der Vaart, J. C. (1981). Effects of vestibular and visual motion perception on task performance. *Acta Psychologica*, 48 (1), 271–287.
- Huang, P.-S. (2004). *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*. Dissertation an der Technische Universität München.
- Kienle, M., Damböck, D., Bubb, H. & Bengler, K. (2013). The ergonomic value of a bidirectional haptic interface when driving a highly automated vehicle. *Cognition, Technology & Work*, 15 (4), 475–482.



- Kienle, M., Damböck, D., Kelsch, J., Flemisch, F. & Bengler, K. (2009). Towards an H-Mode for highly automated vehicles: driving with side sticks. In *Proceedings of the 1st international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications* (S. 19–23).
- Korzenietz, P. (2013). Requirements Analysis for a Universal System Architecture for Ecological and Economical Driver Assistance Systems. In *Automotive Systems Engineering*. Springer.
- Kraiss, K.-F. (1998). Benutzergerechte Automatisierung: Grundlagen und Realisierungskonzepte. *Automatisierungstechnik*, 46 (10), 457–467.
- Krist, R. (1994). *Modellierung des Sitzkomforts: Eine experimentelle Studie*. Dissertation an der Katholischen Universität Eichstätt.
- Lammel, U. (1983). *Gestaltung eines Fahrer Arbeitsplatzes nach ergonomischen Gesichtspunkten*. Diplomarbeit Fachbereich Industrial Design, FH München. (zitiert nach Bubb, 1985)
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation an der Technische Universität München.
- Lee, J. D. & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46 (1), 50–80.
- Lewis, J. R. (2002). Psychometric evaluation of the PSSUQ using data from five years of usability studies. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 14 (3-4), 463–488.
- Lindsay, P. H. & Norman, D. A. (1972). *Human information processing: An introduction to psychology*. New York: Academic Press.
- Merhav, S. J. & Ya'Acov, O. B. (1976). Control Augmentation and Work Load Reduction by Kinesthetic Information from the Manipulator. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* (12), 825–835.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety* (S. 485–520). New York: Plenum Press.
- Motorstown. (2014). *Mercedes-Benz F200*. (<http://www.motorstown.com/imgs/17912-mercedes-benz-f200-5.html>)



- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H. P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2008* (S. 141–150).
- NHTSA. (2013). Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles. *Washington, DC*.
- Nordström, L. (1982). A Mini-Size Aircraft Manual Control. In *Second european annual conference on human decision making and manual control*.
- Otte, D. (2000). Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfaellen. Fahrzeugsicherheit'95. Analyse aus Erhebungen am Unfallort. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik* (31).
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39 (2), 230–253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30 (3), 286–297.
- Penka, A. (2001). *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Herbert Utz Verlag.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* (3), 257–266.
- Rauch, S., Aeberhard, M., Ardelt, M. & Kämpchen, N. (2012). Autonomes Fahren auf der Autobahn - Eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. *5. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. München*.
- Reichart, G. (2000). *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- Reichart, G. & Haller, R. (1995). Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In *Autofahrer und Verkehrssituation*. Köln: Fastenmeier Verlag TÜV Rheinland.
- Ruchatz, T., Bartels, A., Brosig, S. & Efferts, J. (2011). Die Zukunft der Fahrerassistenz. *5. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug*.
- Rühmann, H. (1993). Schnittstellen in Mensch-Maschinen-Systemen. In *Ergonomie* (S. 420–445). Carl Hanser Verlag.



- Saust, F., Wille, J.-M., Lichte, B. & Maurer, M. (2011). Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot Project. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE* (S. 169–174).
- Schaller, T., Schielen, J. & Gradenegger, B. (2008). Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz. *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*.
- Schieben, A., Damböck, D., Kelsch, J., Rausch, H. & Flemisch, F. O. (2008). Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*.
- Schieben, A., Temme, G., Köster, F. & Flemisch, F. (2010). Intermediate results of the Human Factors work in the EU-Project HAVEit: Interaction design and simulator testing of the Joint System for highly automated vehicles. *HFES Europe Conference*.
- Schilgen, O. (1999). *Offenlegungsschrift DE 198 02 983 A 1 - Beweglich gelagerter Handgriff zur fremdbeschleunigungsübertragungsfreien Steuerung einer Maschine oder eines Fahrzeugs oder Teilen davon*.
- Schimmelpfennig, K.-H. & Nackenhorst, U. (1985). Bedeutung der Querschleunigung in der Verkehrsunfallkonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. In *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*.
- Schmidtke, H. (1993). Der Leistungsbegriff in der Ergonomie. In *Ergonomie* (S. 110–116). Carl Hanser Verlag.
- Science City Bristol Ltd. (2013). *Stirling Dynamics wins Technology Strategy Board funding*. (<http://news.sciencecitybristol.com/stirling-dynamics-wins-technology-strategy-board-funding/>)
- Seifert, K. (2002). *Evaluation multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen*. Dissertation an der Technischen Universität Berlin.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation and human supervisory control*. MIT press.
- Sheridan, T. B. & Verplank, W. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators* (Bericht). Massachusetts Institute of Technology.
- Statistisches Bundesamt. (2006). *Verkehr in Deutschland 2006*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (2013a). *Transport und Verkehr*. Wiesbaden.





- Statistisches Bundesamt. (2013b). *Verkehr aktuell*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (2013c). *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden.
- Thrun, S. (2010). *What are we driving at*. (<http://googleblog.blogspot.de/2010/10/what-were-driving-at.html>)
- TRW Automotive Safety Systems GmbH & Co.KG. (1999). *Gebrauchsmusterschrift DE 299 07 180 U 1 - Lenkvorrichtung für ein Kraftfahrzeug*. TRW Automotive Safety Systems GmbH & Co.KG.
- van Zanten, A. & Kost, F. (2012). Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 356–394). Vieweg+ Teubner.
- Wiedemann, M. (2010). *Evaluation eines zweidimensionalen Konzepts zum Steuern von Fahrzeugen mit dem Hand-Finger-System*. Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München.
- Wiener, E. (1989). *Human factors of advanced technology(glass cockpit) transport aircraft* (Bericht). NASA.
- Winner, H., Danner, B. & Steinle, J. (2012). Adaptive Cruise Control. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 478–521). Vieweg+ Teubner.
- Winner, H., Hakuli, S., Bruder, R., Konigorski, U. & Schiele, B. (2006). Conduct-by-Wire-ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz. In *Workshop Fahrerassistenzsysteme* (Bd. 2006, S. 112–125).
- Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (2012). Einleitung. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 1–2). Vieweg+ Teubner.
- Winner, H. & Heuss, O. (2005). X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In *Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug*.
- Wittenstein solutions inc. (2002). *Re-Configurable Yoke Control Loader*. (http://www.wittenstein.aero/e/pdf/WITT-100_yoke_control.pdf)
- Zlocki, A. (2010). Vorausschauendes ACC zur Steigerung der Energieeffizienz von Hybridfahrzeugen. *4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*.



A Anhang

A.1 Demographischer Fragebogen

DEMOGRAPHISCHER FRAGEBOGEN		 
Datum: _____	Proband: _____	
1 Angaben zur Person:		
Alter:		
Geschlecht:	<input type="checkbox"/> Männlich <input type="checkbox"/> Weiblich	
Beruf:		
Haben Sie bisher schon an einem Fahrversuch teilgenommen?		
<input type="checkbox"/> Ja, in einem Simulator		
<input type="checkbox"/> Ja, in einem Versuchsfahrzeug		
<input type="checkbox"/> Ja, beides (Simulator und Versuchsfahrzeug)		
<input type="checkbox"/> Nein, noch nie		
		1



DEMOGRAPHISCHER FRAGEBOGEN



2 Angaben zur Fahrerfahrung:

Seit wann besitzen Sie Ihren Führerschein? (Jahr)	
--	--

Welche Fahrerlaubnisklassen besitzen Sie?	
<input type="checkbox"/> PKW	<input type="checkbox"/> LKW
<input type="checkbox"/> Motorrad	<input type="checkbox"/> Sonstige:

Wie viele km fahren Sie in etwa pro Jahr?
ca. _____ km

Wie oft nutzen Sie derzeit ein Auto?	
<input type="checkbox"/> täglich	<input type="checkbox"/> wöchentlich
<input type="checkbox"/> monatlich	<input type="checkbox"/> seltener

Wo fahren Sie am häufigsten?		
<input type="checkbox"/> Stadtverkehr	<input type="checkbox"/> Landstraße	<input type="checkbox"/> Autobahn

Was fahren Sie öfter?	
<input type="checkbox"/> Kurzstrecke (bis 10km)	<input type="checkbox"/> Langstrecke (über 10km)

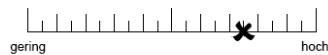


A.2 NASA-TLX

Beanspruchungshöhe

Geben Sie jetzt bitte an, wie hoch die Beanspruchung in den einzelnen Dimensionen war. Markieren sie dazu auf den folgenden Skalen bitte, in welchem Maße Sie sich in den sechs genannten Dimensionen von der Aufgabe beansprucht oder gefordert gesehen haben:

Beispiel:



Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie feiertolerant?



Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Ausführung der Aufgaben

Wie erfolgreich haben Sie ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?





A.3 PSSUQ

PSSUQ

Interpretation*

System Usefulness: 1-8
Information Quality: 9-15
Interface Quality: 16-18
Overall: 1-19

Instruction

This questionnaire, which starts on the following page, gives you an opportunity to tell us your reactions to the system you used. Your responses will help us understand what aspects of the system you are particularly concerned about and the aspects that satisfy you.

To as great a degree as possible, think about all the tasks that you have done with the system while you answer these questions.

Please read each statement and indicate how strongly you agree or disagree with the statement by circling a number on the scale. If a statement does not apply to you, circle N/A.

Please write comments to elaborate on your answers.

After you have completed this questionnaire, I'll go over your answers with you to make sure I understand all of your responses.

Thank you!

* James R. Lewis , IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use, Technical Report 54.786, Human Factors Group, Boca Raton, FL



Instruktion

Dieser Fragebogen gibt Ihnen Gelegenheit, uns Ihre Reaktion auf das System mitzuteilen, das Sie eben verwendet haben. Ihre Antworten werden uns helfen zu verstehen, welche Aspekte des Systems Ihnen kritisch erscheinen und welche Aspekte Sie überzeugen.

Während Sie die Fragen beantworten, denken Sie möglichst an die Aufgaben, die Sie mit dem System bearbeitet haben.

Bitte lesen Sie jede Aussage und geben Sie an, wie stark Sie dieser Aussage zustimmen oder nicht zustimmen, indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie "nicht zu beantworten" an.

Bitte unterstützen Sie Ihre Antworten durch frei formulierte Kommentare.

Nachdem Sie diesen Fragebogen ausgefüllt haben, werden wir Ihre Antworten mit Ihnen gemeinsam durchsprechen, um sicher zu stellen, dass wir alle Ihre Stellungnahmen verstanden haben.

Danke!



1. Overall, I am satisfied with how easy it is to use this system.

Insgesamt bin ich zufrieden, wie leicht dieses System zu bedienen ist.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

2. It was simple to use this system.

Es war einfach, das System zu bedienen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

3. I could effectively complete the tasks and scenarios using this system.

Ich würde die Aufgaben und Szenarien effektiv mit Hilfe des Systems erledigen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

4. I was able to complete the tasks and scenarios quickly using this system.

Ich konnte Aufgaben und Szenarien schnell mit Hilfe des Systems erledigen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____



5. I was able to efficiently complete the tasks and scenarios using this system.

Ich konnte Aufgaben und Szenarien effizient mit Hilfe des Systems erledigen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

6. I felt comfortable using this system.

Ich fühlte mich wohl bei der Bedienung des Systems.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

7. It was easy to learn to use this system.

Es war leicht zu lernen, das System zu bedienen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

8. I believe I could become productive quickly using this system.

Ich glaube ich konnte das System schnell produktiv einsetzen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____



9. Whenever I made a mistake using the system, I could recover easily and quickly.

Immer wenn ich einen Fehler bei der Bedienung des Systems machte, konnte ich diesen leicht und schnell beheben.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

10. The information was effective in helping me complete the tasks and scenarios.

Die Information half mir wirkungsvoll, Aufgaben und Szenarien fertig zu stellen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

11. The organization of information on the system screens was clear.

Die Anordnung der Information auf den Monitoren des Systems war klar.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

12. The interface of this system was pleasant.

Das Interface des Systems war ansprechend.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____



13. I liked using the interface of this system.

Ich mochte es, das Interface des Systems zu verwenden.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten <input type="checkbox"/>
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	------------------------	--

Anmerkungen: _____

14. This system has all the functions and capabilities I expect it to have.

Dieses System hat alle Funktionen und Fähigkeiten, die ich von ihm erwarte.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten <input type="checkbox"/>
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	------------------------	--

Anmerkungen: _____

15. Overall, I am satisfied with this system.

Insgesamt bin ich mit diesem System zufrieden.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten <input type="checkbox"/>
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	------------------------	--

Anmerkungen: _____



A.4 Geschwindigkeitswechsel

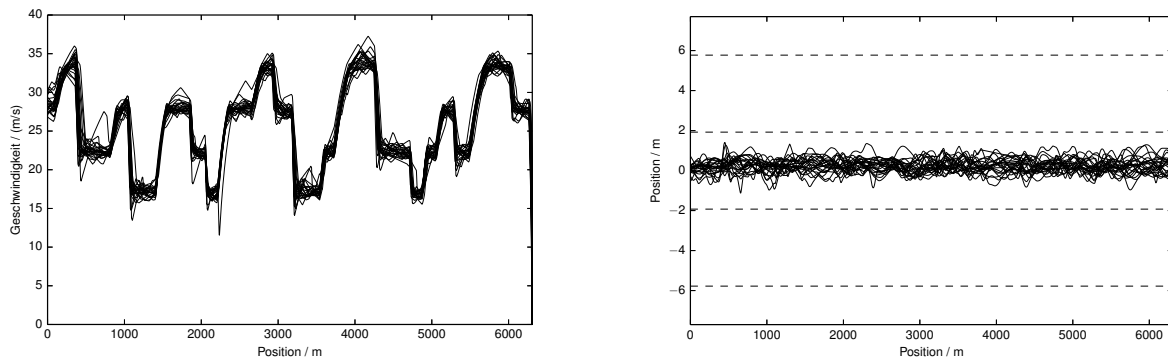


Abbildung A.1: Konventionelles Bedienkonzept

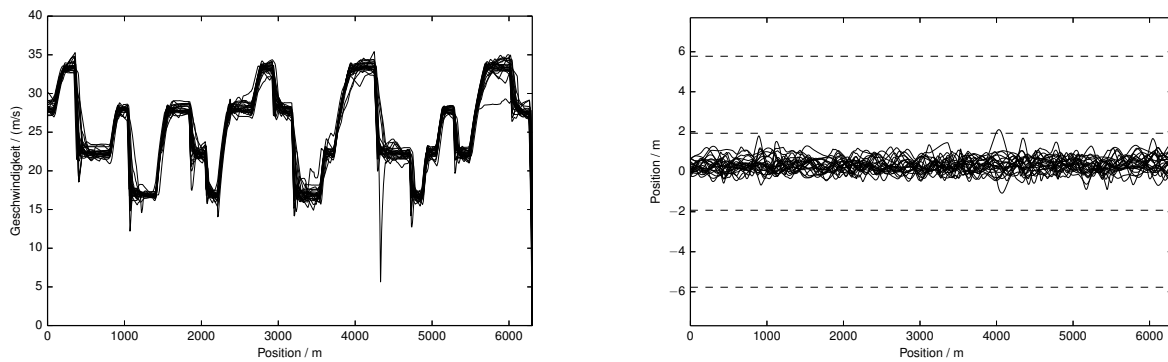


Abbildung A.2: Yoke-Bedienkonzept

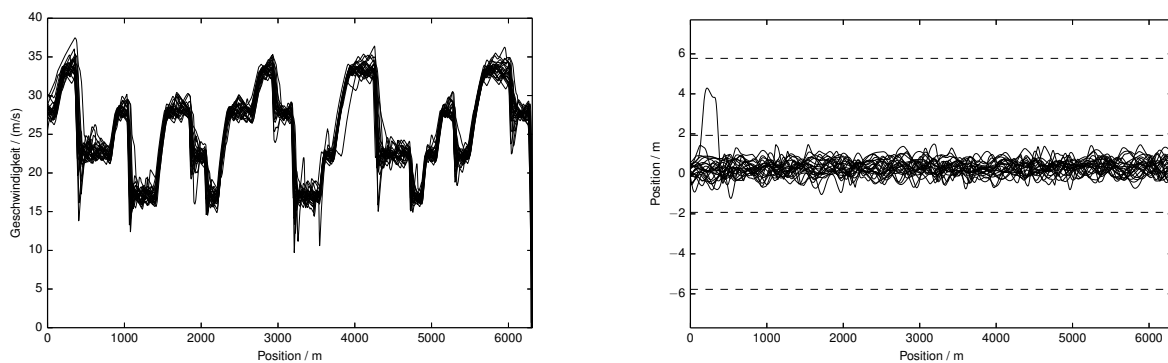


Abbildung A.3: Paddle-Bedienkonzept

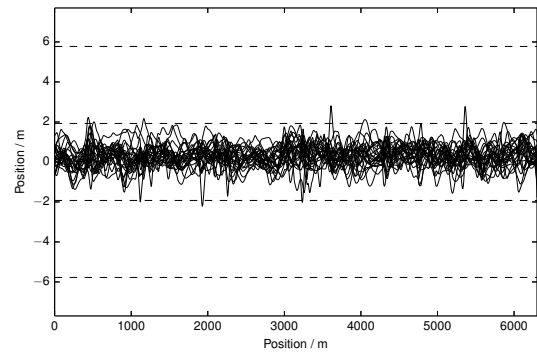
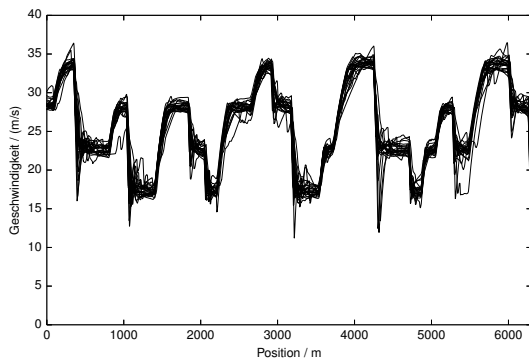


Abbildung A.4: Sidestick-Beidienkonzept

A.5 Fahrstreifenwechsel

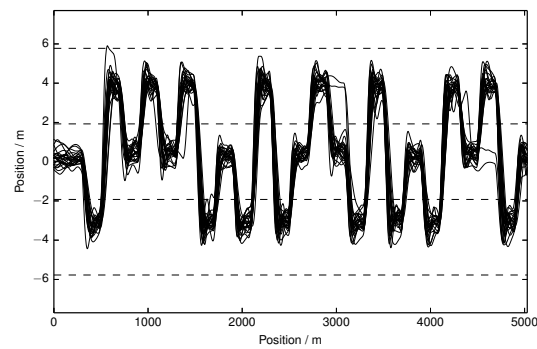
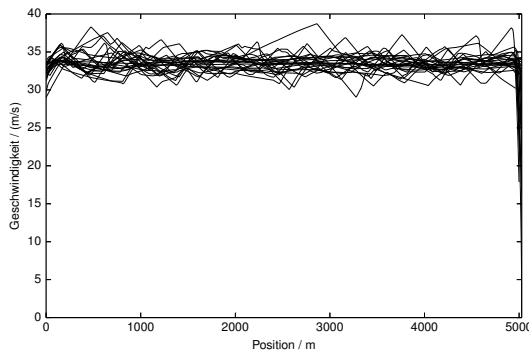


Abbildung A.5: Konventionelles Beidienkonzept

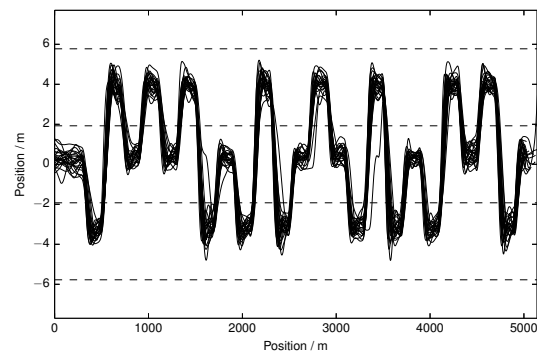
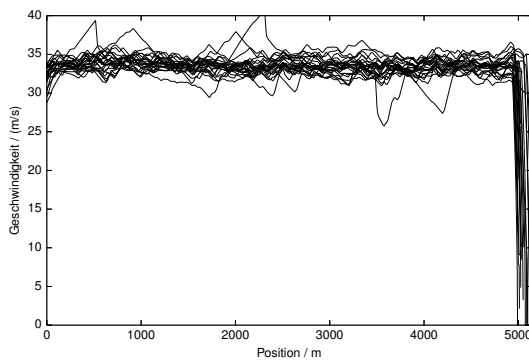


Abbildung A.6: Yoke-Beidienkonzept

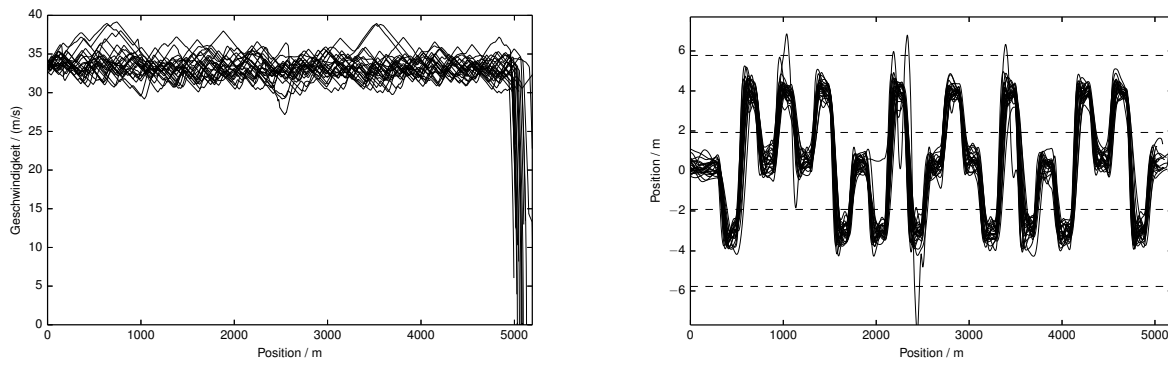


Abbildung A.7: Paddle-Bedienkonzept

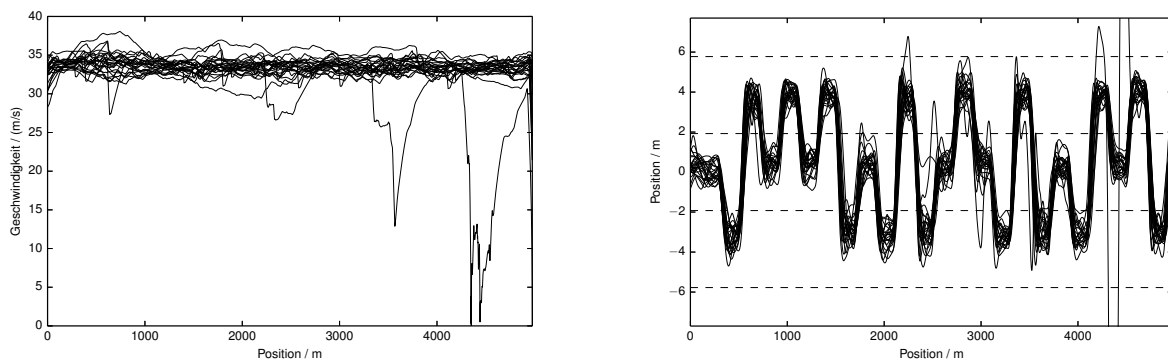


Abbildung A.8: Sidestick-Bedienkonzept

A.6 Längs-Querführungsaufgabe

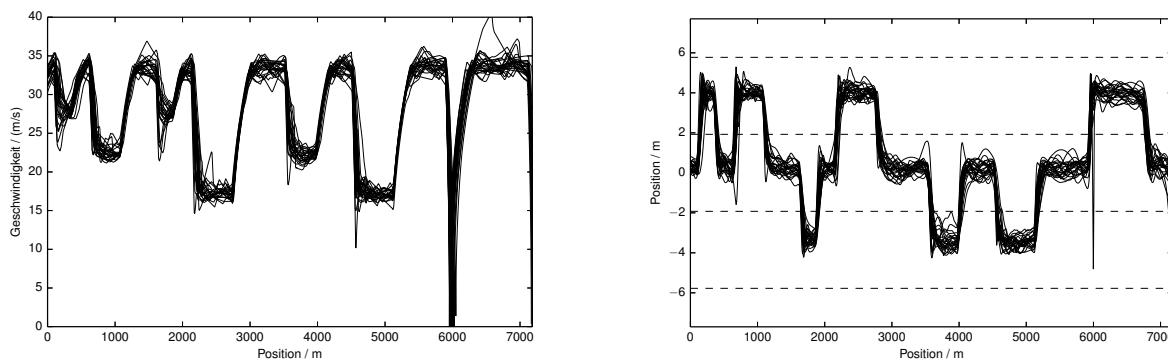


Abbildung A.9: Konventionelles Bedienkonzept

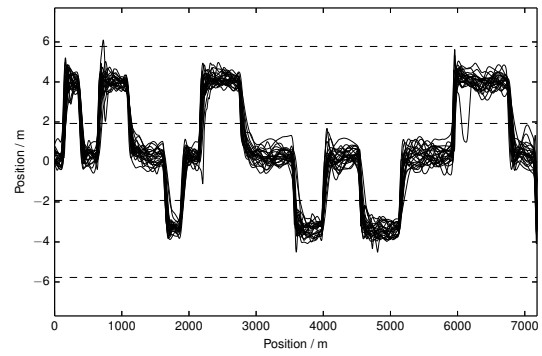
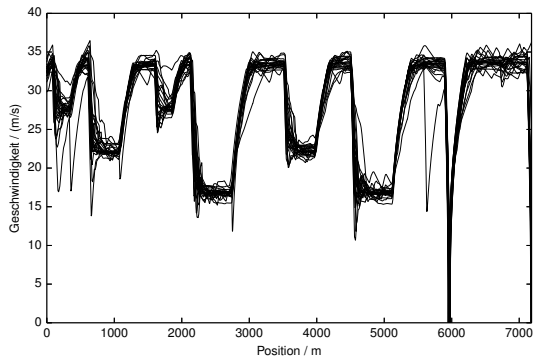


Abbildung A.10: Yoke-Bedienkonzept

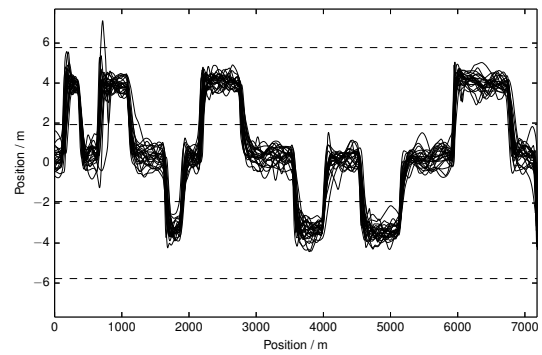
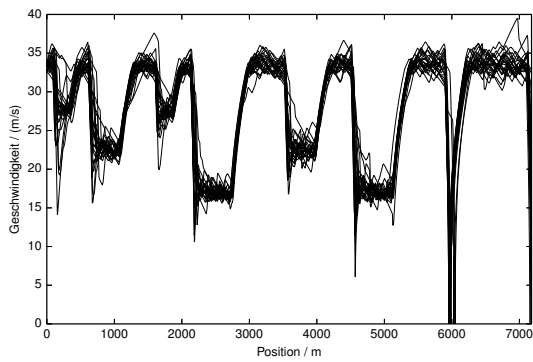


Abbildung A.11: Paddle-Bedienkonzept

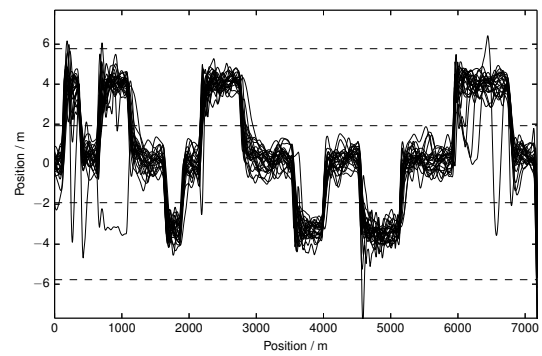
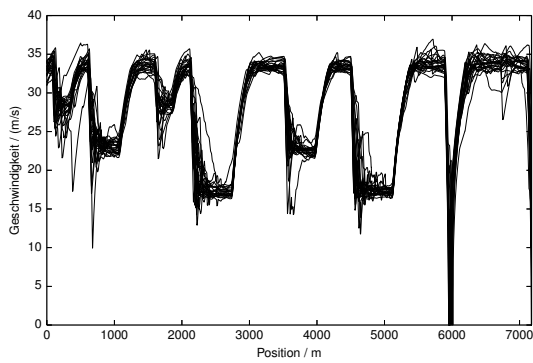


Abbildung A.12: Sidestick-Bedienkonzept



A.7 Landstraße

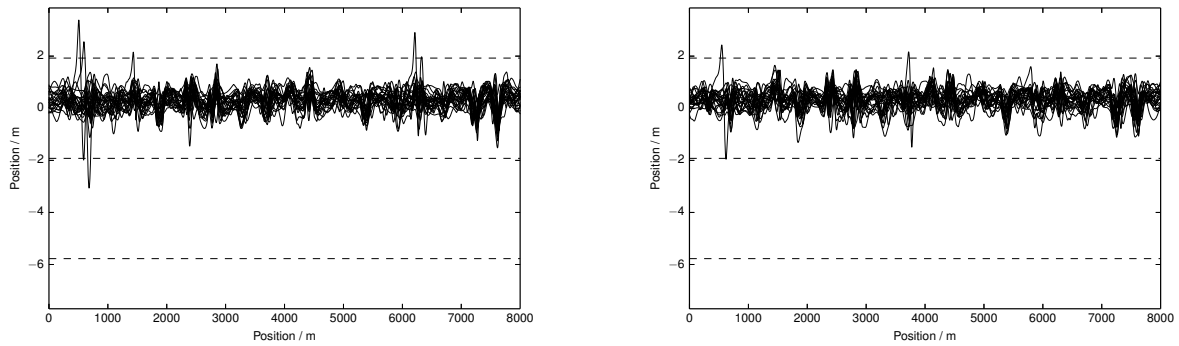


Abbildung A.13: Konventionelles Bedienkonzept und Yoke-Konzept

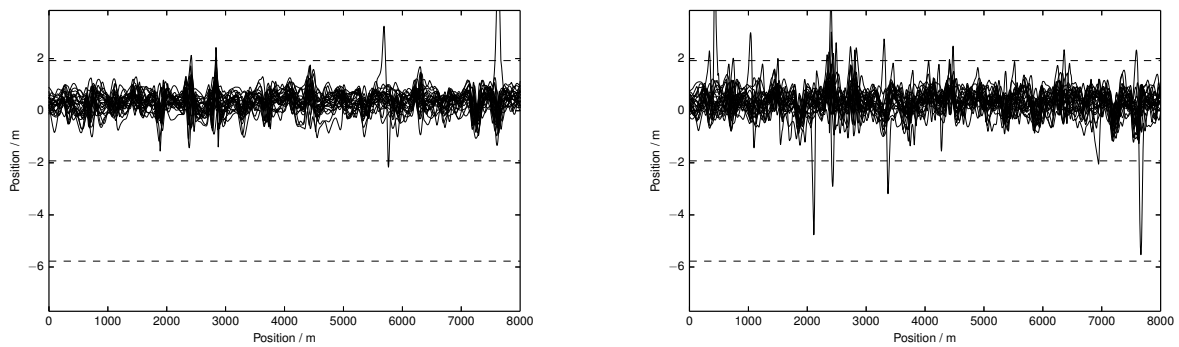


Abbildung A.14: Paddle- und Sidestick-Konzept



B Anhang

B.1 Fragebogen 1

Instruktion

Dieser Fragebogen gibt Ihnen Gelegenheit, uns Ihre Reaktion auf das System mitzuteilen, das Sie eben verwendet haben. Ihre Antworten werden uns helfen zu verstehen, welche Aspekte des Systems Ihnen kritisch erscheinen und welche Aspekte Sie überzeugen.

Während Sie die Fragen beantworten, denken Sie möglichst an die Aufgaben, die Sie mit dem System bearbeitet haben.

Bitte lesen Sie jede Aussage und geben Sie an, wie stark Sie dieser Aussage zustimmen oder nicht zustimmen, indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie "nicht zu beantworten" an.

Bitte unterstützen Sie Ihre Antworten durch frei formulierte Kommentare.

Nachdem Sie diesen Fragebogen ausgefüllt haben, werden wir Ihre Antworten mit Ihnen gemeinsam durchsprechen, um sicher zu stellen, dass wir alle Ihre Stellungnahmen verstanden haben.

Danke!



1. Ich konnte die Automation gut wahrnehmen.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 **Stimme gar nicht zu** nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

2. Ich konnte die Signale der Automation gut verstehen.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 **Stimme gar nicht zu** nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

3. Ich hatte das Gefühl gegen die Automation arbeiten zu müssen.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 **Stimme gar nicht zu** nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

4. Ich fühle mich mit dem Bedienkonzept sicher.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 **Stimme gar nicht zu** nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____



5. Ich fühle mich mit dem Bedienkonzept wohl.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 Stimme gar nicht zu nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

6. Ich bin gerne mit dem Bedienkonzept gefahren.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 Stimme gar nicht zu nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

7. Das Bedienkonzept hat alle Funktionen und Fähigkeiten, die ich von ihm erwarte.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 Stimme gar nicht zu nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____

8. Insgesamt bin ich zufrieden, wie leicht das Fahrzeug mit dem Bedienkonzept zu bedienen ist.

Stimme voll zu 1 2 3 4 5 6 7 Stimme gar nicht zu nicht zu beantworten

Anmerkungen: _____



B.2 Fragebogen 2

Instruktion

Dieser Fragebogen gibt Ihnen Gelegenheit, uns Ihre Reaktion auf die aufgetretene Fehlfunktion mitzuteilen, die Sie erlebt haben.

Während Sie die Fragen beantworten, denken Sie an das jeweilige Bedienkonzept und die aufgetretene Fehlfunktion.

Bitte lesen Sie jede Aussage und geben Sie an, wie stark Sie dieser Aussage zustimmen oder nicht zustimmen, indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie "nicht zu beantworten" an.

Bitte unterstützen Sie Ihre Antworten durch frei formulierte Kommentare.

Nachdem Sie diesen Fragebogen ausgefüllt haben, werden wir Ihre Antworten mit Ihnen gemeinsam durchsprechen, um sicher zu stellen, dass wir alle Ihre Stellungnahmen verstanden haben.

Danke!



Konzept Lenkrad / Gaspedal

1. Ich habe die Fehlfunktion schnell wahrgenommen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

2. Ich konnte die Fehlfunktion schnell identifizieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

3. Ich konnte die Fehlfunktion schnell korrigieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

4. Ich konnte die Fehlfunktion gut korrigieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____



Konzept Yoke

1. Ich habe die Fehlfunktion schnell wahrgenommen.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

2. Ich konnte die Fehlfunktion schnell identifizieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

3. Ich konnte die Fehlfunktion schnell korrigieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____

4. Ich konnte die Fehlfunktion gut korrigieren.

Stimme voll zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme gar nicht zu	nicht zu beantworten
									<input type="checkbox"/>

Anmerkungen: _____



Mit welchem Bedienkonzept würden Sie lieber teilautomatisiert fahren?

Lenkrad / Gaspedal

Yoke



B.3 Ausfall

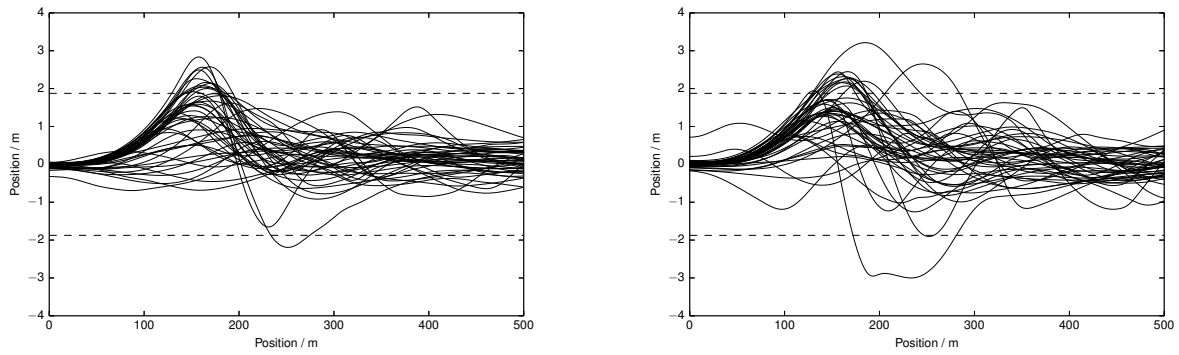


Abbildung B.1: Konventionelles Bedienkonzept und Yoke-Konzept