



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN

LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE

**Gestaltung der Fahrdynamik beim Fahrstreifenwechselmanöver als
Rückmeldung für den Fahrer beim automatisierten Fahren**

Alexander Tobias Lange

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: Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein

Die Dissertation wurde am 04.07.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.11.2017 angenommen.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München in den Jahren 2012 - 2016. Einen großen Teil dieser Zeit verbrachte ich im Rahmen eines INI.TUM Kooperationsprojektes in der Vorentwicklung für automatisierte Fahrfunktionen bei der AUDI AG in Ingolstadt.

Da die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Arbeit selten ganz allein im stillen Kämmerlein entstehen, möchte ich im Folgenden einigen Personen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und meine Promotionszeit zu der spannenden und intensiven Zeit gemacht haben, die sie war.

Ich beginne mit meinem Doktorvater Prof. Bengler, der diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht hat. Herr Bengler, ich danke Ihnen für die vielen konstruktiven Gespräche, Ihre Geduld aber auch für Ihre nachdrücklichen Worte, vor allem nach meiner Zeit bei Ihnen am Lehrstuhl, die mich motiviert haben diese Arbeit nun endlich fertig zu schreiben. Des Weiteren gilt mein Dank Prof. Eckstein für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Aufgabe des Zweitprüfers sowie Prof. Fottner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein herzlicher Dank geht auch an meine ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Ergonomie, mit denen die Zeit an der Uni immer sehr angenehm und kurzweilig war. Insbesondere möchte ich den Kollegen aus der Forschungsgruppe „Wahrnehmung Fahrdynamik“ für die intensiven fachlichen als auch überfachlichen Diskussionen danken.

Ein riesiger Dank geht an die Truppe aus dem „Projekthaus“ bzw. dem späteren AI-Lab bei Audi. Ohne Eure Unterstützung wäre ein Großteil der vorliegenden Arbeit gar nicht möglich gewesen. Darüber hinaus findet man wohl selten so ein herzliches und gleichzeitig engagiertes und kompetentes Entwicklerteam wie Euch. Danke für die Unterstützung und die tolle Zeit. Bleibt wie ihr seid!

In diesem Zusammenhang möchte ich auch Dr. Karl-Heinz Siedersberger für die fachliche Betreuung sowie sein Geschick danken, im Umfeld eines Großunternehmens einen derart guten Nährboden für wissenschaftliche Arbeit zu schaffen. Weiter so Siedi!

Ich danke außerdem meinem Promotions-Weggefährten Martin Albert, der während unserer gemeinsamen Zeit immer ein offenes Ohr, motivierende Worte oder Zeit für eine Testfahrt übrig hatte. Die unzähligen, mal frustrierenden und mal euphorischen Stunden auf dem Prüfgelände werden mir lange in Erinnerung bleiben. Danke Martin!

Des Weiteren möchte ich meinen Freunden und meiner Familie danken, die mich immer unterstützt haben auch wenn sie promotionsbedingt viele Wochenenden und Feierabende auf mich verzichten mussten. Danke für die Motivation, das Korrekturlesen, aber auch die zwischenzeitlichen Ablenkungen!

Zu guter Letzt danke ich vielmals meiner Freundin, die mich in den Höhen und Tiefen und vor allem im Endspurt meiner Promotionszeit unterstützt und motiviert hat. Vielen Dank Stephi für deine Unterstützung und deine so unglaublich lebenswerte Art!

Zusammenfassung

Das automatisierte Fahren ist aktuell auf einem Entwicklungsstand, der es erfordert, dass der Fahrer das Automationssystem seines Fahrzeugs entweder dauerhaft überwacht oder zumindest an Systemgrenzen als Rückfallebene zur Verfügung steht. Für diese Aufgaben ist ein angemessenes Situationsbewusstsein des Fahrers notwendig, welches durch adäquate Rückmeldung von Informationen der Automation an den Fahrer unterstützt werden kann. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, welchen Nutzen die vestibuläre Rückmeldung, die der Fahrer zwangsläufig über die Bewegung des Fahrzeugs erhält, im Kontext des automatisierten Fahrens besitzt. Darauf aufbauend wird erörtert auf welche Art und Weise die Bewegung im Rahmen der technischen und physikalischen Möglichkeiten gestaltet werden sollte, um möglichst informativ und gleichzeitig vom Fahrer akzeptiert zu sein.

Zu Beginn der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Automatisierung der Fahraufgabe erläutert und auf die neue Rolle des Fahrers als Überwacher und Rückfallebene der Automation eingegangen. Anschließend erfolgt ein Überblick über Wahrnehmungsschwellen des vestibulären Sinnessystems sowie zum fahrdynamischen Komfortbereich menschlicher Fahrer. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden Anforderungen und Gestaltungsempfehlungen an die automatisierte Fahrzeugbewegung im Sinne einer Rückmeldung von Zustand und Absicht des Automationssystems entwickelt. Demnach sollten Fahrzeugbewegungen, sofern sie für ein Fahrmanöver charakteristisch sind, deutlich wahrnehmbar sein, aber eine vom Fahrer maximal akzeptierte Dynamik nicht überschreiten. Darüber hinaus wird die Anforderung gestellt, dass rückmelderelevante Bewegungen möglichst frühzeitig erfolgen. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf automatisierten Fahrstreifenwechselmanövern auf der Autobahn.

Zur realitätsnahen Untersuchung vestibulärer Rückmeldung wird ein prototypisches Automationssystem entwickelt, bei dem die Dynamik des Fahrstreifenwechsels variiert werden kann. Eine erste Studie auf dem Testgelände befasst sich mit der grundsätzlichen Akzeptanz spürbarer Fahrdynamik beim automatisierten Fahren und zeigt, dass Fahrer insbesondere in der Rolle des Überwachers, Bewegungsrückmeldung wünschen. Die maximal akzeptierte Querdynamik beim Fahrstreifenwechselmanöver wird quantitativ in Form der Fahrstreifenwechselzeit für eine Geschwindigkeit von 30 und 60 km/h sowie für einen überwachenden und nebenbeschäftigten Fahrer bestimmt. Sie bewegt sich in einem Bereich von 4,4-5,4 s , wobei Probanden bei 60 km/h eine kleinere Fahrstreifenwechselzeit akzeptieren als bei 30 km/h . Überwachende Fahrer wählen darüber hinaus eine höhere Querdynamik als nebenbeschäftigte Fahrer.

In der zweiten Probandenstudie wird die Wirkung einer frühzeitigen Rückmeldung des Fahrstreifenwechselmanövers im Realverkehr auf der Autobahn untersucht. Dazu werden zwei Gestaltungsvarianten miteinander verglichen. In der „Feedbackausprägung“ beginnt das Fahrzeug im Gegensatz zur „Standardausprägung“ schon mehrere Sekunden vor dem Ausscheren zu beschleunigen und versetzt sich zudem bereits um einige Zentimeter in Richtung des Zielfahrstreifens. Es zeigt sich, dass die Probanden das Fahrstreifenwechselmanöver in der „Feedbackausprägung“ signifikant vorhersehbarer beurteilen und dieses im Mittel 0,9 s früher erkennen.

Abstract

Automated driving is currently on a level of development that requires the driver to either continuously supervise the automation system of his vehicle or at least be available as a fall-back level at system boundaries. For this role appropriate situation awareness of the driver is essential. Situation awareness can be supported by providing adequate feedback from the automation system to the driver. This thesis investigates the benefits of vestibular feedback, which the driver inevitably receives due to vehicle motion, for automated driving. Furthermore, it describes the way in which vehicle motion should be designed, considering technical and physical constraints, to be as informative as possible and at the same time accepted by the driver.

The thesis begins with the theoretic fundamentals for automating the driving task and discusses the new role of the driver as the automation system's supervisor and fall-back level. Subsequently, an overview of the perceptual performance of the human vestibular system and the driver's comfort thresholds are presented. Based on these fundamentals, requirements and design recommendations for a vehicle motion that provides feedback regarding the state and intention of the automation system are developed. Accordingly, it is demanded that vehicle motions which are characteristic for a specific driving maneuver be clearly perceptible without exceeding the driver's accepted dynamics threshold. Furthermore, it is required that motions which are relevant for feedback occur in a timely manner. The focus of the following considerations is on the automated lane change maneuver in highway scenarios.

For a realistic investigation of vestibular feedback a prototypical automation system is developed which allows the adaption of the lane change maneuver's dynamic driving behavior. A first study on the test track addresses the acceptance of noticeable driving dynamics during automated driving in general. The study shows that drivers do want motion feedback, especially if they have to supervise the automation system. The accepted lateral dynamic of the lane change maneuver is measured in the form of the lane change time. The experiment is conducted at a driving speed of 30 and 60 *km/h* as well as with a supervising and a non-supervising driver. The resulting lane change times range from 4,4 to 5,4 *s*. At a speed of 60 *km/h* the test persons accept a lower lane change time than at 30 *km/h* and supervising drivers choose higher lateral dynamics than non-supervising drivers.

In the second study the effect of timely feedback of lane change maneuvers is evaluated in real traffic on a highway. For this purpose two motion design variants are compared with each other. When in "feedback mode" - as opposed to the "standard mode" - the vehicle already starts accelerating several seconds before pulling out. In addition, it simultaneously builds up a lateral offset of several centimeters towards the target lane. It turns out that in "feedback mode" the lane change maneuver is rated significantly more foreseeable than in "standard mode", and that, on average, the test persons also notice the maneuver's beginning 0,9 *s* earlier.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	6
2.1	Fahrermodelle	7
2.1.1	Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe	7
2.1.2	Modell zielgerichteter Tätigkeiten des Menschen	7
2.1.3	Situationsbewusstsein und menschlicher Entscheidungsprozess	9
2.1.4	Zusammenfassung	10
2.2	Automatisierung der Fahraufgabe	11
2.2.1	Subsystem Wahrnehmung	12
2.2.2	Subsystem Verhaltensgenerierung	13
2.2.3	Zusammenfassung	19
2.3	Mensch und Automation	20
2.3.1	Aufteilung der Fahraufgabe	21
2.3.2	Systemgrenzen	23
2.3.3	Taxonomien zur Klassifikation von Automationssystemen	24
2.3.4	Der Mensch als Überwacher der Automation	26
2.3.5	Zusammenfassung	28
2.4	Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung	28
2.4.1	Grundlagen	28
2.4.2	Relevante Sinnessysteme für die Fahrzeugführung	29
2.4.3	Wahrnehmungsschwellen	32
2.5	Komfortable Fahrzeugbewegung	36
2.5.1	Komfort im Kontext des automatisierten Fahrens	36
2.5.2	Menschliche Akzeptanzbereiche der Fahrzeugbewegung	38
2.6	Forschungsbedarf	41
3	Bewegungsrückmeldung beim automatisierten Fahren	43
3.1	Zielsetzung und adressierte Abstraktionsebene	43
3.2	Anforderungen an die Rückmeldung	45
3.3	Methodik	47
3.3.1	Fahrzeugbewegung als vestibuläres Anzeigeelement	47
3.3.2	Zuordnung von Bewegungselementen zu Manövertransitionen	49
3.3.3	Erarbeitung von Gestaltungsempfehlungen	53
4	Entwurf des Automationssystems	60
4.1	Betrachtetes Zielsystem	60

4.2	Systemmodell	61
4.2.1	Navigation	61
4.2.2	Funktionssteuerung	62
4.2.3	Manöverebene	62
4.2.4	Trajektorienplanungsebene	65
4.2.5	Stabilisierungsebene	71
4.3	Implementierung	72
4.3.1	Versuchsfahrzeug	72
4.3.2	Prototypisch umgesetzte Teilkomponenten	73
4.4	Zusammenfassung	76
5	Akzeptierte Dynamik der Fahrzeugbewegung (Studie 1)	77
5.1	Fragestellung und Hypothesengenerierung	78
5.2	Versuchsdesign	79
5.2.1	Probandenkollektiv	79
5.2.2	Versuchsaufbau	79
5.2.3	Versuchsdurchführung	80
5.3	Ergebnisse	82
5.3.1	Befragung	82
5.3.2	Fahrversuch	83
5.3.3	Kommentare	85
5.4	Zusammenfassung und Diskussion	86
6	Evaluierung der Bewegungsrückmeldung (Studie 2)	89
6.1	Versuchsszenario	89
6.2	Gestaltung des Fahrstreifenwechselmanövers	91
6.2.1	Querbewegung	91
6.2.2	Längsbewegung	94
6.2.3	Gestaltungsvarianten	94
6.3	Fragestellung und Hypothesengenerierung	96
6.3.1	Vorhersehbarkeit von Fahrmanövern	97
6.3.2	Aufmerksamkeit	98
6.3.3	Deskriptive Fragestellungen	99
6.4	Versuchsdesign	101
6.4.1	Probandenkollektiv	101
6.4.2	Versuchsaufbau	102
6.4.3	Versuchsdurchführung	104
6.5	Ergebnisse	105
6.5.1	Fahrverhalten	106
6.5.2	Fahrstreifenwechseleerkennungszeit	110
6.5.3	AOI-Verteilung	111
6.5.4	Fragebogen	113
6.5.5	Mentale Beanspruchung	117
6.6	Zusammenfassung und Diskussion	118
7	Zusammenfassung und Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	127

Abbildungsverzeichnis	139
Tabellenverzeichnis	141
Abkürzungsverzeichnis	143
Anhang	145

1 Einleitung

Seit seiner Erfindung im Jahr 1886 (Daimler AG, 2016) ist das Automobil zu einem nicht mehr wegzudenkenden Teil unserer Gesellschaft geworden. Es steht für individuelle Mobilität, Freiheit und Fahrspaß und ist für viele Statussymbol und Ausdruck ihrer Persönlichkeit. Im Jahr 2016 sind laut Kraftfahrt-Bundesamt (2016) 45,1 Millionen Personenkraftwagen in Deutschland zugelassen. In 130 Jahren Entwicklung ist das Auto nicht nur immer leistungsfähiger, zuverlässiger, effizienter und komfortabler geworden, sondern hat außerdem enorme Fortschritte im Bereich der Fahrzeugsicherheit gemacht. Letzteres ist einerseits das Resultat der Entwicklung passiver Sicherheitssysteme zur Reduzierung der Folgen eines Unfalls. Beispiele hierfür sind Sicherheitsgurt, Airbag oder verbesserte Karosseriestrukturen. Andererseits haben vor allem in den letzten Jahren aktive Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Unfällen beigetragen. Die Einführung derartiger Systeme begann bereits 1978 mit dem Antiblockiersystem (ABS) (Robert Bosch GmbH, 2016). Es folgten weitere Systeme wie die Antischlupfregelung (ASR) sowie die Elektronische Stabilitätskontrolle (ESC). Fortschritte in der Sensortechnologie und dem maschinellen Sehen führten dazu, dass neben propriozeptiver Sensorik zur Wahrnehmung des eigenen Fahrzeugs auch exterozeptive Sensorik zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfeldes ihren Weg ins Automobil fand (Bengler et al., 2014). Damit lassen sich Sicherheitssysteme wie ein Spurverlassenswarner oder ein Notbremsassistent realisieren, aber auch Komfortsysteme wie Adaptive Cruise Control (ACC), die den Fahrer bei der Fahrzeugführung entlasten, wurden marktreif (VDA, 2015).

Mit den Fortschritten bei der Entwicklung dieser Fahrerassistenzsysteme rückt auch die Realisierbarkeit einer vergleichsweise alten Vision in scheinbar greifbare Nähe: Die vollständige Automatisierung der Fahrzeugführung. Abbildung 1.1 zeigt eine Illustration aus dem Jahr 1956, die dieses Szenario beschreibt. Das Bild verdeutlicht eine Motivation für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge: Die Nutzung der Fahrzeit für fahrfremde Tätigkeiten. Darüber hinaus verspricht man sich durch die Automatisierung eine weitere Erhöhung der Verkehrssicherheit sowie die Optimierung des Verkehrsflusses in einer Welt mit immer weiter steigendem Mobilitätsbedarf (Maurer, Gerdes, Lenz & Winner, 2015). Die Forschung und Entwicklung zum automatisierten Fahren findet anfangs noch größtenteils im universitären Umfeld statt. Insbesondere sind hier die Forschungsfahrzeuge aus dem europäischen Forschungsprojekt PROMETHEUS



Abbildung 1.1: Zeitschriftenwerbung amerikanischer Energieunternehmen (Illustration von H. Miller, 1956)

(Dickmanns et al., 1994) sowie aus den Wettbewerben der DARPA, einer Behörde des Verteidigungsministeriums der USA, zu nennen (Montemerlo et al., 2008; Urmson et al., 2008). In den vergangenen Jahren ist das Interesse der Industrie am automatisierten Fahren stark gestiegen. Viele große Automobilhersteller, aber auch Technologiefirmen aus anderen Branchen arbeiten öffentlichkeitswirksam an der Marktreife automatisierter Fahrfunktionen (Matthaei et al., 2015). Exemplarisch können Demonstrationsfahrten von Forschungsfahrzeugen wie einem Versuchsfahrzeug von BMW, das automatisiert auf der Autobahn A9 fährt und dabei selbständig Fahrstreifenwechselmanöver durchführt (Rauch, Aeberhard, Ardelt & Kämpchen, 2012), einer Mercedes S-Klasse, welche die Strecke von Mannheim nach Pforzheim selbständig bewältigt (Ziegler et al., 2014), einem Audi A7, der automatisiert vom Silicon Valley nach Las Vegas fährt (Zeit Online, 2015) oder einem Fahrzeug von Google, das sich selbständig im Stadtverkehr bewegt und nicht mal mehr ein Lenkrad verbaut hat (IEEE Spektrum, 2014) genannt werden. Parallel dazu kommen erste Automationssysteme in Serienfahrzeugen auf den Markt, die beispielsweise im Stau oder auf autobahnähnlichen Strecken die Längs- und Querführung des Fahrzeugs übernehmen können (Beiker, 2015; VDA, 2015).

1.1 Motivation

Wenngleich die Fähigkeiten aktueller Forschungsfahrzeuge und der bereits in Serienfahrzeugen verfügbaren Systeme beeindruckend sind, so zeigt eine kritische Betrachtung die Grenzen heutiger Systeme: Sie müssen nach wie vor dauerhaft durch den Fahrer oder im

Fall der Forschungsfahrzeuge durch einen Sicherheitsingenieur überwacht werden und der Mensch muss jederzeit zur Übernahme der Fahraufgabe bereit sein. Die Tatsache, dass bereits im Jahr 1995 über längere Strecken eine überwachte automatische Längs- und Querführung auf Autobahnen möglich war (Maurer, 2000, S. 135) und heute, 20 Jahre später, erste Systeme mit einer vergleichbaren Funktionalität in Serienfahrzeugen verfügbar sind, macht die enorme Herausforderung des automatisierten Fahrens deutlich. Neben der Lösung technischer Problemstellungen sowie der Klärung von Absicherungsfragen (Winner, 2015) liegen diese ebenso in der Beantwortung rechtlicher Fragestellungen (Lutz, 2016). Es steht außer Frage, dass der menschliche Fahrer noch eine gewisse Zeit als Rückfallebene in automatisiert fahrenden Fahrzeugen vorhanden und auch notwendig sein wird. Diese Rolle kann zunächst beinhalten, dass er die automatisiert ausgeführten Fahraufgabe noch dauerhaft überwacht und im Falle eines von ihm erkannten Fehlverhaltens die Fahrzeugführung wieder übernimmt. In späteren Entwicklungsstufen werden automatisierte Fahrfunktionen dazu fähig sein, ihre Grenzen selbst zu erkennen. Der Fahrer muss jedoch weiterhin in der Lage sein, bei einer vom Automationssystem ausgelösten Übernahmeaufforderung, die Fahrzeugführung wieder zu übernehmen (Gasser, 2012).

In den neuesten Seriensystemen für das automatisierte Fahren werden die Herausforderungen, die diese Rolle für den Fahrer mit sich bringt, bei weitem nicht ausreichend berücksichtigt. Ein zentrales Problem ist, dass Funktionsweise, Fähigkeiten und Grenzen aktueller Automationssysteme dem Fahrer nur ungenügend kommuniziert werden (Flemisch, Winner, Bengler & Bruder, 2017). Dies kann zu unangemessenem Vertrauen in die Automation, Missbrauch der Systeme (Parasuraman & Riley, 1997) sowie mangelndem Situations- bzw. Systembewusstsein (Endsley, 1995; Sarter & Woods, 1995) führen. Auswirkungen dieser Effekte sind im harmlosen Fall nur unzufriedene Kunden, die sich unvorbereitet vom Automationssystem im Stich gelassen fühlen (Greis, 2016). Im schlimmsten Fall führten sie bereits zu tödlichen Unfällen (Zeit Online, 2016).

Ziel der Forschung und Entwicklung zum automatisierten Fahren ist es daher nicht nur technische Lösungen zur kontinuierlichen Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Automationssysteme zu finden, sondern auch Möglichkeiten zu entwickeln, wie man den Fahrer bei seiner neuen Aufgabe als Überwacher und Rückfallebene unterstützen kann. Dabei gilt es insbesondere, die genannten negativen Effekte der Fahrzeugautomatisierung zu minimieren. Eine zentrale Fragestellung ist dabei, wie man den Fahrer, der motorisch nicht mehr zwingend in den Regelkreis der Fahrzeugführung eingebunden ist, zumindest geistig im sogenannten „Loop“ halten kann. Damit ist gemeint, dass er ein angemessenes Situationsbewusstsein hat, sich des Zustandes des Automationssystems bewusst ist und auch motorisch in der Lage ist, die Fahrzeugführung wieder aufzunehmen (vgl. Hörwick & Wimmer, 2010).

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ein Großteil bisheriger Forschungsaktivitäten befasst sich damit, die genannten negativen Effekte der Fahrzeugautomatisierung durch die geeignete Gestaltung des Bedien- und Anzeigekonzeptes zu mindern. Beispiele dafür sind das kontaktanaloge Head-Up Display (HUD), welches Informationen über Umfeld und Automationszustand direkt ins Sichtfeld des Fahrers projiziert (Damböck, Weißgerber, Kienle & Bengler, 2012), im Armaturenbrett verbaute Leuchteisten, die den Fahrer auf Gefahren aufmerksam machen, oder den Zustand der Automation farblich darstellen (Utesch, 2014) sowie Konzepte, die verschiedene Ansätze kombinieren (Othersen, 2016). Darüber hinaus gibt es vielversprechende Aktivitäten, den Fahrer durch die Interaktion mit dem Automationssystem im Loop zu halten (Flemisch et al., 2003; Winner & Hakuli, 2006; Franz, Kauer, Bruder & Geyer, 2012; Zimmermann, Bauer, Lutteken, Rothkirch & Bengler, 2014; Albert, Lange, Schmidt, Wimmer & Bengler, 2015; Cramer, Lange & Bengler, 2015).

Alle genannten Forschungsaktivitäten schenken dem, bei der manuellen Fahrt als Rückmeldung über den Fahrzeugzustand so wichtigen „Popometer“ (Bubb, 2015b, S. 100), also der vestibulären und somatosensorischen (vgl. Kapitel 2.4) Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung durch den Fahrer, vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit. Dennoch sind in wissenschaftlichen Veröffentlichungen immer wieder Aussagen zu entdecken, die darauf hindeuten, dass diesem Rückmeldekanal eine höhere Bedeutung beigemessen werden sollte:

„Über die haptischen bzw. kinästhetischen Rückmeldungen des Fahrzeugs erfolgte demnach eine angemessene Differenzierung der Systemzustände“ (Petermann & Schlag, 2010, S. 15)

„In order to actively promote mode awareness, it should be possible to differentiate the stages from each other. Not only by means of what is indicated to the driver but also by means of their specific control behaviour.“ (Flemisch et al., 2009, S. 42)

„the addition of non-visual vehicle feedback increases situation awareness above vision alone“ (Walker, Stanton & Young, 2006)

„Untersuchungen haben gezeigt, dass der Fahrer durch den Ruck veranlasst wird, den Blick aufmerksam auf die Straße voraus zu richten“ (Reschka, Rieken & Maurer, 2015, S. 920)

Das zuletzt genannte Zitat bezieht sich auf ein Fahrerassistenzsystem zur Kollisionswarnung, welches die Bewegungswahrnehmung des Fahrers durch Einsatz eines sogenannten Warnrucks bereits erfolgreich zur Aufmerksamkeitslenkung nutzt (vgl. Färber & Maurer, 2005). Vor dem Hintergrund einer möglichst multimodalen Rückmeldung von Informationen an den Fahrer (Bubb, 2015b) und dem bisher kaum erforschten Potential der Bewegungsrückmeldung im Kontext kontinuierlich wirkender Automationssysteme, wird für die vorliegende Arbeit ein dringender Forschungsbedarf in der Analyse und Bewertung der Bewegungswahrnehmung des Fahrers für die Rückmeldung von Informationen des Automationssystems an den Fahrer identifiziert. Aufbauend auf dieser Analyse sollen Gestaltungsempfehlungen für das Bewegungsverhalten eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs erarbeitet und am Beispiel des Fahrstreifenwechselmanövers implementiert und validiert werden.

Die Arbeit ist neben der Einleitung in sechs Kapitel untergliedert. **Kapitel 2** erläutert die Grundlagen der Automatisierung der Fahraufgabe sowie das Zusammenspiel zwischen Mensch und Automation. Es folgt ein Überblick über die menschliche Wahrnehmung im Hinblick auf die Fahraufgabe. Insbesondere wird dabei auf die Bewegungswahrnehmung des Menschen sowie übliche Dynamikbereiche der Fahrzeugbewegung in manueller Fahrt eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Formulierung des Forschungsbedarfs für diese Arbeit und der in den nachfolgenden Kapiteln behandelten Fragestellung.

In **Kapitel 3** wird das Konzept der Bewegungsrückmeldung an den Fahrer beim automatisierten Fahren konkretisiert. Es erfolgt die Analyse der Fahrzeugbewegung sowie die Ableitung von Anforderungen an eine derartige Rückmeldung. Anschließend werden Gestaltungsempfehlungen für die Auslegung der automatisierten Fahrzeugbewegung erarbeitet.

In **Kapitel 4** wird ein prototypisches System zur automatisierten Fahrzeugführung entwickelt und dessen Implementierung in einem Versuchsfahrzeug beschrieben. Das entwickelte Automationssystem bildet die Grundlage für die Anwendung der erarbeiteten Gestaltungsempfehlungen und wird für die Durchführung der beschriebenen Probandenstudien genutzt.

Kapitel 5 und 6 beschreiben zwei Probandenstudien. Die erste befasst sich mit der Ermittlung von Akzeptanzschwellen für die Dynamik der automatisierten Fahrzeugbewegung beim Fahrstreifenwechselmanöver. In der zweiten Studie wird die Wirksamkeit des in Kapitel 3 entwickelten Rückmeldekonzepes bewertet.

Kapitel 7 schließt die Arbeit mit der Diskussion der entstandenen Erkenntnisse und Ergebnisse sowie einem Ausblick auf weitere Forschungsumfänge ab.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel vermittelt die Grundlagen für die Konkretisierung des eingangs beschriebenen Forschungsbedarfs sowie die darauf folgenden Konzepte und Untersuchungen. Als Basis für die Strukturierung des Kapitels dient der in Abbildung 2.1 dargestellte Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis nach Bubb (2015a). Vor dem Hintergrund der Automatisierung der Fahraufgabe wird anstelle des Begriffs *Fahrer* der Begriff *Fahrzeugführer* verwendet. Die Aufgabe des *Fahrzeugführers* kann von verschiedenen Akteuren ausgeführt werden. Handelt es sich um einen menschlichen Fahrzeugführer, wird vom *Fahrer* gesprochen. Übernimmt ein technisches System die Fahrzeugführung, so wird dieses als *Automation* oder *Automationssystem* bezeichnet. Unter dem Begriff *Fahrzeug* wird im Folgenden nur das Fahrzeug selbst ohne die unter Umständen darin verbaute *Automation* verstanden.

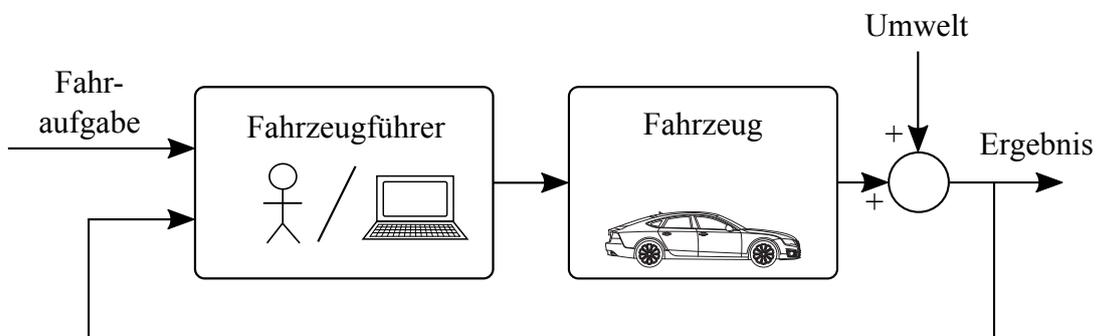


Abbildung 2.1: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis in Anlehnung an Bubb (2015a)

Der nachfolgende Abschnitt geht zunächst auf die Modellierung des Menschen als Fahrzeugführer in diesem Regelkreis ein. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 2.2 Ansätze zur Automatisierung der Fahraufgabe. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung des Fahrverhaltens. Aspekte der maschinellen Umfeldwahrnehmung werden nur am Rande betrachtet. Abschnitt 2.3 geht auf das Mensch-Maschine-System aus Fahrer und Automation ein, indem mögliche Aufgabenverteilungen zwischen den beiden Akteuren erläutert werden. Insbesondere wird hierbei die, im Fahrkontext neue, Aufgabe der Überwachung beschrieben.

Bezugnehmend auf die Rückmeldung von Zuständen des Automationssystems an den Fahrer in Form der Fahrzeugbewegung folgt ein Überblick über die Bewegungswahrnehmung des Menschen (Kapitel 2.4). In diesem Zusammenhang wird ebenfalls der Begriff des Fahrkomforts im Kontext des automatisierten Fahrens betrachtet.

Als Abschluss des Kapitels wird der Forschungsbedarf hinsichtlich der Bewegungsrückmeldung beim automatisierten Fahren detailliert.

2.1 Fahrermodelle

Die Bildung von Modellen der realen Welt ist seit jeher zentraler Bestandteil der Wissenschaft. Modelle helfen dem Menschen, verschiedenste Zusammenhänge in unserer Welt zu beschreiben und zu verstehen. Im Folgenden werden drei Modelle vorgestellt, die uns helfen, den Menschen in seiner Rolle als Fahrer in dem in Abbildung 2.1 dargestellten Regelkreis besser zu verstehen.

2.1.1 Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe

Ein vor allem im deutschsprachigen Raum viel zitiertes Werk ist die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges (1982). Es betrachtet weniger den Menschen als Fahrer, als vielmehr die Aufgabe der Fahrzeugführung, welche er ausführt. Donges (1982) unterteilt die Fahraufgabe in drei Hierarchieebenen: Navigation, Bahnführung und Stabilisierung (siehe Abbildung 2.2 rechts). Jede Ebene gibt Ziele an die jeweils darunterliegende vor. Dies beginnt mit der eigentlichen Transportaufgabe, aus welcher auf der Navigationsebene eine Fahrtroute sowie deren zeitlicher Ablauf generiert werden. Auf Bahnführungsebene wird auf Basis dieser Fahrtroute und unter Einbeziehung des vom Fahrer wahrgenommenen Umfelds eine Sollspur sowie eine Sollgeschwindigkeit bestimmt. Diese werden an die Stabilisierungsebene weitergegeben, auf der die notwendigen Stelleingriffe an Lenkrad, Fahrpedal und Bremse ermittelt werden, um der Sollspur und -geschwindigkeit mit „annehmbarer“ Genauigkeit zu folgen.

2.1.2 Modell zielgerichteter Tätigkeiten des Menschen

Ein Modell, welches nicht speziell für die Fahrzeugführung konzipiert wurde, sich aber gut darauf anwenden lässt, ist das Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten

des Menschen nach Rasmussen (1983). Im Gegensatz zum Modell von Donges (1982) geht es weniger auf die Frage ein, *was* zu tun ist, als viel mehr auf das *Wie*. Das Modell unterscheidet dreierlei Kategorien von Verhalten: Das wissensbasierte, das regelbasierte sowie das fertigkeitbasierte (siehe Abbildung 2.2 links). Wissensbasiertes Verhalten zeichnet sich durch eine hohe kognitive Beanspruchung aus und tritt in neuartigen oder sehr komplexen Situationen zu Tage. Hier überlegt sich der Mensch unter Zuhilfenahme seines vorhandenen Wissens verschiedene Handlungsmöglichkeiten zur Bewältigung der Situation und wählt die seines Erachtens geeignetste daraus aus. Je nachdem wie erfolgreich eine Handlung war, kann diese nach einer gewissen Zeit zu einer Regel für die nächst niedrigere Verhaltensebene werden. Wie der Name dieser regelbasierten Ebene schon sagt, werden dort Entscheidungen auf Basis von vorhanden Verhaltensregeln getroffen. Hierzu ordnet der Mensch eine wahrgenommene Situation zuerst einer in seinem Repertoire von Verhaltensregeln hinterlegten Regel zu, um die Aufgabe anschließend gemäß dieser Regel zu lösen. Auf der niedrigsten Ebene des Modells, dem fertigkeitbasierten Verhalten, handelt der Mensch unterbewusst in Form von Reiz-Reaktions-Mechanismen. Verhaltensweisen dieser Ebene sind durch Erfahrung und häufige Anwendung geprägt.

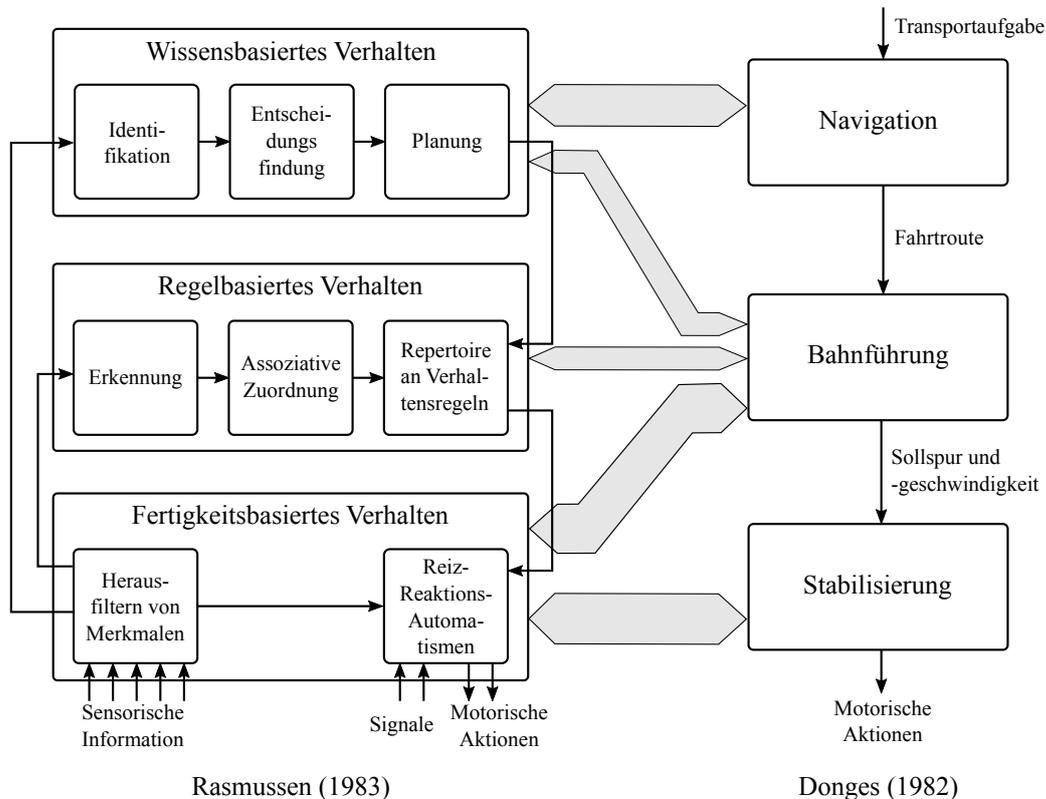


Abbildung 2.2: Assoziation des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen (1983) und der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges (1982), in Anlehnung an Donges (2015)

Wie Donges (2015) zeigt, sollten die beiden beschriebenen Modelle keineswegs als zwei Alternativen gesehen werden, sondern vielmehr als einander ergänzende Ansätze. Das Modell von Donges blickt aus Ingenieurssicht auf die Fahraufgabe. Es beschreibt, welche Teilaufgaben in welcher Reihenfolge und mit welcher Vorausschau ausgeführt werden müssen. Es ist ein zeitlich statisches Modell. So hängt einerseits jede untergeordnete Aufgabe von der darüberliegenden ab und gleichzeitig wird der betrachtete Zeithorizont mit tieferen Ebenen immer kürzer. Das Modell von Rasmussen ist ein psychologischer Ansatz und beschreibt die Art und Weise wie ein Mensch zielgerichtete Tätigkeiten ausführt. Verhaltensweisen, welche eindeutig einer Ebene des Donges-Modells zuzuordnen sind, können unterschiedlichen Ebenen des Rasmussen-Modells angehören. Die Zuordnung hängt einerseits stark von der Komplexität einer Situation ab, andererseits spielt auch die Trainiertheit des Menschen eine entscheidende Rolle. Dies bedingt auch, dass sich die Gewichtung der einzelnen Ebenen dynamisch mit der Zeit ändern kann. So laufen beispielsweise bei einem Fahranfänger noch sehr viele Handlungen wissensbasiert ab. Erst nach und nach werden diese durch Wiederholung und Erfahrung zu regel- oder gar fertigkeitbasierten Verhaltensweisen. Für einen geübten Fahrer können die Ebenen der beiden Modelle, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, zugeordnet werden. Handlungen auf Stabilisierungsebene sind größtenteils dem fertigkeitbasierten Verhalten zuzuordnen. Ähnlich verhält es sich mit Navigationsaufgaben, die generell wissensbasierte Verhaltensweisen darstellen. Verhalten auf Bahnführungsebene sind dahingegen nicht eindeutig klassifizierbar. Sie können, je nach dem wie zeitkritisch oder ungewöhnlich sie sind, auf allen drei Verhaltenskategorien behandelt werden.

2.1.3 Situationsbewusstsein und menschlicher Entscheidungsprozess

Ein drittes Modell ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Es entstand im Kontext der Luftfahrtforschung und beschreibt den menschlichen Entscheidungsprozess von der Wahrnehmung des Umfelds bis hin zur Ausführung einer Handlung (Endsley, 1995). Ein zentraler Aspekt des Modells ist das Konstrukt des Situationsbewusstseins („Situation Awareness“). Situationsbewusstsein beinhaltet gemäß Endsley (1995) die Wahrnehmung der Elemente der Umgebung (Level 1), das Verständnis über ihre Bedeutung (Level 2) sowie die Projektion ihres Zustands in die Zukunft (Level 3). Das Situationsbewusstsein ist für den Menschen die Basis auf der er Entscheidungen fällt, welche wiederum zu Handlungen führen. Vor allem für die höheren Ebenen des Situationsbewusstseins (Levels 2 und 3) ist ein zur vorliegenden Situation passendes mentales Modell von essentieller Bedeutung (Endsley, 1995; Jones & Endsley, 2000). Unter mentalen Modellen versteht Endsley (1995) Schemata, welche das Verhalten von bestimmten Systemen

abbilden. Diese Schemata bilden sich in ähnlicher Weise wie die Verhaltensregeln von Rasmussen (1983) durch Übung und Erfahrung aus und werden dem Langzeitgedächtnis zugeordnet.

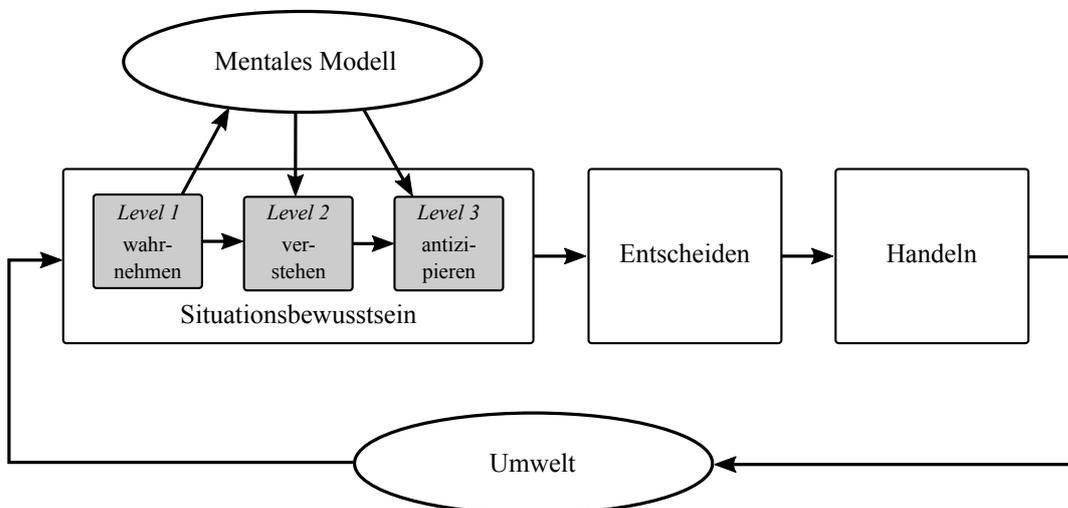


Abbildung 2.3: Menschlicher Entscheidungsprozess nach Endsley (1995) sowie Jones und Endsley (2000) in Anlehnung an Damböck (2013)

Wie die Modelle von Donges (1982) und Rasmussen (1983), kann auch das Modell von Endsley (1995) mit den bestehenden Modellen in Einklang gebracht werden. Ein Beispiel hierfür liefert Damböck (2013), der das Modell von Donges (1982) mit dem von Endsley (1995) kombiniert. Er assoziiert das Situationsbewusstsein sowie die Entscheidungsfindung mit der Ebene der Bahnführung. Die letztendliche Handlung findet gemäß Damböck (2013) auf der Stabilisierungsebene statt.

2.1.4 Zusammenfassung

Die beschriebenen Modelle stellen lediglich eine kleine Auswahl der existierenden Fahrer bzw. Mensch-Modelle dar. Sie zeigen drei mögliche Sichtweisen auf den Fahrer. Das Modell von Donges (1982) beschreibt, wie die Fahraufgabe in die drei hierarchisch angeordneten Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung aufgeteilt werden kann. Es stellt eine wichtige Basis für die im folgenden Abschnitt beschriebene funktionale Architektur dar. Das Modell von Rasmussen (1983) skizziert, wie eine Aufgabe je nach Komplexität und Erfahrung des Menschen mit der Aufgabe durch reaktive Reiz-Reaktions-Mechanismen, gelernte Verhaltensregeln oder wissensbasierte Planung und Entscheidung bewältigt werden kann. Die verschiedenen Verhaltensweisen finden sich auch bei den, in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen, technischen Modulen

zur Bewältigung der Fahraufgabe wieder. Endsley (1995) fokussiert auf die Prozesse des Situationsverstehens, welche insbesondere für die Entscheidungsfindung in einem dynamischen Umfeld auf Bahnführungsebene essentiell sind. Das Konstrukt des Situationsbewusstseins wird in den nachfolgenden Abschnitten vor allem im Kontext der neuen Rolle des Fahrers als Überwacher des Automationssystems wieder aufgegriffen.

2.2 Automatisierung der Fahraufgabe

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Ansätze zur Automatisierung der Aufgaben des Fahrers. Dazu wird der Fahrer im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis aus Abbildung 2.1 durch ein Automationssystem substituiert. Eine Grobarchitektur, die viele Ansätze nach aktuellem Stand der Technik in ähnlicher Art aufweisen (vgl. z.B. Bartels, Berger, Krahn und Rumpe (2009), Baker und Dolan (2009), Ardel, Coester und Kaempchen (2012), Hohm, Lotz, Fochler, Lueke und Winner (2014) oder Matthaei (2015)), ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Demnach besteht das Automationssystem aus den beiden Subsystemen Wahrnehmung und Verhaltensgenerierung. Das Wahrnehmungs-Subsystem verarbeitet die Daten der im Fahrzeug verbauten Sensorik und generiert daraus ein Modell des Fahrzeugs sowie seiner Umgebung. Die Verhaltensgenerierung ist das zentrale Modul, auf welchem der Fokus dieser Arbeit liegt. Sie verarbeitet die Daten des Wahrnehmungssystems und trifft Verhaltensentscheidungen, welche in Form von Handlungen über die Aktoren am Fahrzeug umgesetzt werden. Die in Abbildung 2.4 gewählte Zuordnung von Sensorik und Aktorik zum Automationssystem wird zugunsten der Analogie zu Sinnesorganen und Gliedmaßen des menschlichen Fahrzeugführers gewählt. Da es sich bei Sensoren und Aktoren jedoch grundsätzlich um Bauteile des Fahrzeugs handelt, wäre eine Zuordnung zu diesem ebenfalls gerechtfertigt.

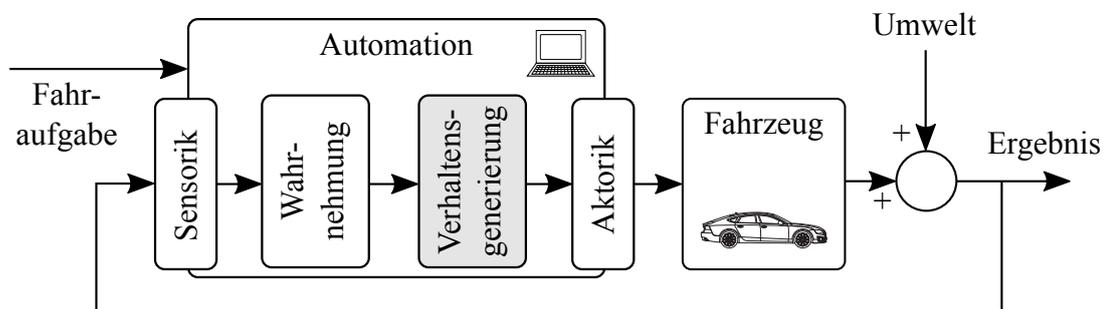


Abbildung 2.4: Das Automationssystem im Regelkreis der Fahrzeugführung

Vergleicht man die Architektur aus Abbildung 2.4 mit dem Modell des menschlichen Entscheidungsprozesses aus Abbildung 2.3, so fällt auf, dass zwischen Wahrnehmung

und Entscheidung noch das Verstehen sowie die Antizipation einer Situation stattfindet. Eine Zuordnung dieser Verarbeitungsschritte zu Wahrnehmung- oder Verhaltensgenerierung ist nur bedingt möglich. Gemäß Matthaei (2015) liefert das Wahrnehmungssystem ein von der spezifischen Fahrfunktion bzw. -mission unabhängiges Umfeldmodell. Dieses kann aber durchaus Aspekte des Verstehens und Antizipierens enthalten, indem es Elemente der Umgebung zueinander in Beziehung setzt und eine Prädiktion deren zukünftigen Verhaltens liefert. Aspekte der Situation, welche von der spezifischen Funktion bzw. den von der Automation verfolgten Zielen abhängen (z.B. Auswahl eines längsführungsrelevanten Zielobjektes), werden dahingegen der Verhaltensgenerierung zugeordnet.

2.2.1 Subsystem Wahrnehmung

Das Wahrnehmungssystem steht nicht im Fokus dieser Arbeit, dennoch wird an dieser Stelle kurz darauf eingegangen. Aufgabe des Wahrnehmungssystems ist es, ein Modell des Fahrzeugumfeldes zu generieren, welches alle für die Fahrzeugführung notwendigen Informationen bereitstellt. Dies beinhaltet sowohl die Wahrnehmung des Fahrzeugumfeldes als auch die Lokalisierung des eigenen Fahrzeuges in der Welt sowie die Ermittlung dessen Bewegungszustands. Das Umfeldmodell enthält sowohl Elemente der Infrastruktur, wie Fahrbahnen, Fahrstreifen und Verkehrszeichen als auch statische Hindernisse und dynamische Elemente, wie andere Verkehrsteilnehmer.

Das Umfeldmodell kann aus unterschiedlichsten Quellen befüllt werden. Üblich ist der Einsatz von Fahrzeugsensorik, Kartendaten oder auch Informationen, die per Car2X Kommunikation ins Fahrzeug gelangen (Stiller, 2005). Sensoren zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes sind z.B. Kamerasysteme, Radarsensoren, Laserscanner oder Ultraschallsensoren. Als propriozeptive Sensorik zur Erfassung des Bewegungszustandes kommen Gierraten- und Beschleunigungssensoren zum Einsatz (Winner, Hakuli, Lotz & Singer, 2015). Die Lokalisierung kann sowohl global mittels Global Positioning System (GPS) als auch relativ zu einer digitalen Karte z.B. mittels Landmarkenerkennung erfolgen (Steinhardt & Leinen, 2015). Für die Wahrnehmung der Umgebung werden die Sensordaten ähnlich dem Modell des Situationsbewusstseins von Endsley (1995) in mehreren Ebenen zu immer abstrakteren Informationen aggregiert. Die Verarbeitung beginnt üblicherweise mit der Detektion von Merkmalen bestimmter Objekte der Umgebung in den Sensorrohdaten. Auf Basis der detektierten Merkmale werden Objekthypothesen instanziiert, welche anschließend mit Hilfe von Modellen wie z.B. dem einer Fahrbahnmarkierung oder eines Fahrzeuges über nachfolgende Detektionen eines oder mehrerer Sensoren fortlaufend getrackt werden (Dietmayer, Kirchner & Kämpchen, 2005). Auf den nächst höheren Ebenen werden die wahrgenommenen Objekte miteinander in Bezie-

hung gesetzt und deren zukünftiges Verhalten prädiziert. Dies beinhaltet beispielsweise die Zuordnung von Fahrzeugen zu Fahrstreifen, die Schätzung von Intentionen getrackter Fahrzeuge sowie die Prädiktion des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer. Das Umfeldmodell kann folglich als Situationsbewusstsein der Automation gesehen werden (vgl. M. T. Schmidt, Hofmann & Bouzouraa, 2014) und dient dem nachfolgend beschriebenen Subsystem der Verhaltensgenerierung als Entscheidungsgrundlage.

2.2.2 Subsystem Verhaltensgenerierung

Das Subsystem Verhaltensgenerierung kann als der Teil des Automationssystems gesehen werden, der für die eigentliche Fahraufgabe im Sinne des Modells nach Donges (1982) verantwortlich ist. Viele in der Literatur beschriebene Ansätze stützen sich bei der Strukturierung dieses Subsystems auf die Modelle von Donges (1982) und Rasmussen (1983). In diesem Sinne erfolgt einerseits eine Unterteilung nach der Art der Aufgabe und andererseits eine Unterscheidung nach der Verhaltensebene. Weitere Modularisierungsansätze stammen aus dem Forschungsgebiet der Robotik. Hier werden häufig deliberative Architekturen von reaktiven bzw. verhaltensbasierten Architekturen abgegrenzt (Arkin, 2000). Die beiden Klassen sind jedoch weitgehend mit dem Modell von Rasmussen (1983) kompatibel. So können deliberative Architekturen, die sich durch planende, „zielgesteuerte“ (Rasmussen, 1983) Ansätze auszeichnen, der wissensbasierten Ebene zugeordnet werden. Reaktive Verhalten entsprechen den fertigkeitbasierten Reiz-Reaktions-Mechanismen nach Rasmussen (1983). Charakteristisch ist hier eine enge Kopplung von Sensor und Aktor. Beide Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile. So sind deliberative Architekturen hinsichtlich ihrer zielorientierten Arbeitsweise den reaktiven Architekturen überlegen. Gleichzeitig liegt aber ein Vorteil der reaktiven Ansätze in ihrer schnellen Reaktion auf sich ändernde Eingangsbedingungen. Ein Konzept, das sich im Laufe der Entwicklung automatisiert fahrender Fahrzeuge durchgesetzt hat, sind hybride Modelle, die planende und regelbasierte mit reaktiven Ansätzen kombinieren (Arkin, 2000).

Ebenen der Verhaltensgenerierung

Innerhalb des Subsystems der Verhaltensgenerierung erfolgt im Allgemeinen eine hierarchische Strukturierung im Sinne des Modells von Donges (1982). Die drei Ebenen werden dabei jedoch nicht immer eins zu eins übernommen. Tabelle 2.1 zeigt die hierarchische Strukturierung der Fahraufgabe in den Architekturen von vier ausgewählten Forschungseinrichtungen. Dies sind die Carnegie Mellon University (CMU) mit der Ver-

öffentlichung von Baker und Dolan (2009), die Universität der Bundeswehr in München (UniBw) mit Veröffentlichungen von Maurer (2000), Siedersberger (2003) und Pellkofer (2003), die Technische Universität Braunschweig (TU-BS) mit der Veröffentlichung von Matthaei (2015) sowie die Architektur des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bzw. der Daimler AG, welche von Ziegler et al. (2014) beschrieben wird.

Tabelle 2.1: Hierarchische Strukturierung der Fahraufgabe in verschiedenen Funktionsarchitekturen aus der Literatur

Donges (1982)	Baker und Dolan (2009)	Maurer (2000)	Matthaei (2015)	Ziegler et al. (2014)
Navigation	Mission Planning	Missionsplanung	Strategische Ebene	–
Bahnführung	Behavioral Executive	Verhaltensentscheidung	Taktische Ebene	Behavior Generation
	Motion Planning	Modellbasierte Steuerungen & Regelungen	Operative Ebene	Trajectory Planning
Regelungen		Trajectory Control		
Stabilisierung				

Eine Ebene bei der sich die meisten Ansätze in der Literatur einig sind, ist die Navigation. Diese wird unter verschiedenen Namen in fast allen Architekturen genannt und entspricht in ihrem Umfang auch den von Donges (1982) beschriebenen Aufgaben. In der Veröffentlichung von Ziegler et al. (2014) ist die Navigationsebene nicht explizit beschrieben. Sie ist jedoch implizit in der verwendeten hochgenauen Karte vorhanden, welche nur eine mögliche Fahrtroute enthält.

Die Bahnführungsebene nach Donges (1982) wird in nahezu allen Architekturen in zwei Teilebenen untergliedert. Die erste Teilebene übernimmt Manöverentscheidungen und bestimmt das taktische Verhalten des Fahrzeugs. Die zweite Teilebene führt diese Entscheidungen operativ aus, indem sie die exakte Bewegung des Fahrzeugs plant. Die Unterteilung der Bahnführungsebene in Entscheidung und Bewegungsplanung ist in allen Architekturen bis auf die der TU-BS vorhanden. Hier wird zwar ebenfalls zwischen taktischer und operativer Ebene unterschieden, diese werden jedoch gleichbedeutend mit der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene nach Donges (1982) behandelt. Betrachtet man die genauen Aufgaben innerhalb der operativen Ebene der TU-BS, so findet hier die „Trajektorienberechnung“ und „Fahrzeugstabilisierung“ (Matthaei, 2015) statt. Die Trajektorienberechnung ließe sich, den Ausführungen von Donges (1982) folgend, dem operativen Teil der Bahnführungsebene zuordnen. Matthaei (2015) ordnet sie jedoch abweichend davon der Stabilisierungsebene zu.

Die Stabilisierungsebene ist bei den meisten Architekturen zu finden. Sie beinhaltet die Regler und Vorsteuerungen, um mit dem Fahrzeug die geplanten Trajektorien abzufahren. In den Architekturbeschreibungen der CMU ist sie nicht explizit erwähnt. Vermutlich wird sie hier entweder der „Motion Planning“ Ebene oder dem Fahrzeug selbst zugeordnet.

Wie die dargelegten Beispiele zeigen, lassen sich die meisten in der Literatur zu findenden Architekturen in einer vier Ebenen Hierarchie einordnen. Diese Art der Aufteilung ist – wenn auch nicht im Kontext einer funktionalen Systemarchitektur – ebenfalls bei Löper, Kelsch und Flemisch (2008), Damböck (2013, S. 33) sowie Flemisch, Bengler, Bubb, Winner und Bruder (2014) zu finden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit findet ebenfalls eine Unterscheidung dieser vier Ebenen statt. Namentlich wird dabei von *Navigationsebene*, *Manöverebene*, *Trajektorienebene* und *Stabilisierungsebene* gesprochen. Im Folgenden werden Ansätze aus der Literatur zur Bewältigung der Aufgaben auf diesen vier Ebenen vorgestellt. Der Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt auf der Manöver- und Trajektorienebene, da diese die größte Relevanz für die weitere Arbeit haben.

Navigationsebene

Technisch werden die Aufgaben auf Navigationsebene heutzutage in den meisten handelsüblichen Navigationsgeräten umgesetzt. Es kommt eine digitale Karte des zu berücksichtigenden Straßennetzes zum Einsatz. Das Straßennetz wird in Form eines Graphen, welcher aus Knoten und Kanten aufgebaut ist, repräsentiert. Ein Routingalgorithmus sucht in diesem Graphen die nach bestimmten Kriterien günstigste Route von einem Start- zu einem Zielelement des Graphen. Für weiterführende Informationen sei z.B. auf Kleine-Besten et al. (2015) verwiesen. Da diese Art der Aufgabenbearbeitung eindeutig planenden Charakter besitzt, kann sie im Allgemeinen dem wissensbasierten Verhalten zugeordnet werden.

Resultat der Navigation ist eine Fahrtroute bzw. ein Missionsplan, der die gewählte Fahrtroute anhand von örtlich und zeitlich zugeordneten Missionselementen beschreibt.

Manöverebene

Die Manöverebene verarbeitet den von der Navigationsebene erzeugten Missionsplan und setzt diesen durch die Auswahl geeigneter Fahrmanöver um. Die Ebene wird häufig auch als Ebene der Verhaltensentscheidung bezeichnet, da sie sich für ein zur

vorliegenden Situation passendes Verhalten (oder Manöver) entscheidet. Für die Manöverentscheidung wird neben dem Missionsplan auch das statische und dynamische Fahrzeugumfeld berücksichtigt. In Abbildung 2.2 werden der Bahnführungsebene von Donges (1982) alle drei Verhaltensweisen von Rasmussen (1983) zugeordnet. Ein Blick in die Literatur zeigt, dass auch bei der technischen Umsetzung auf Manöverplanungsebene verschiedene Verhaltensarten angewendet werden. Hauptsächlich sind dies regelbasierte und wissensbasierte Ansätze. Im Folgenden werden drei Ansätze, die primär für die automatisierte Autobahnfahrt entwickelt wurden, vorgestellt.

Pellkofer (2003) nutzt ein Konstrukt aus vielen unscharfen Wenn-Dann-Regeln, um auf Basis der Fahrtroute sowie des Fahrzeugumfeldes Manöverentscheidungen zu treffen. Die Regeln werten Situationsaspekte aus, wie z.B. „langsames Vorderfahrzeug vorhanden“. Diese sind nicht als eindeutig wahr oder falsch klassifiziert, sondern treffen zu einem gewissen Grad zu. Dementsprechend weisen auch die darauf aufbauenden Wenn-Dann-Regeln einen bestimmten Erfüllungsgrad auf. Die letztendliche Verhaltensentscheidung wird durch die Regel mit dem höchsten Erfüllungsgrad bestimmt.

Ein weiterer Ansatz ist bei Ardelt et al. (2012) zu finden. Sie unterscheiden zwischen strategischen und taktischen Fahrstreifenwechselmanövern. Fahrstreifenwechsel, die lediglich der Umsetzung des Missionsplans, also dem Folgen der Route dienen, werden als strategisch bezeichnet. Solche, die auf das Umfeld des Fahrzeugs reagieren oder sonstige Ziele verfolgen, werden als taktische Fahrstreifenwechsel definiert (vgl. auch Siedersberger, 2003). Strategische Wechselentscheidungen werden bei Ardelt et al. (2012) regelbasiert anhand der Fahrtroute getroffen. Für taktische Wechselmanöver wird eine Funktion ausgewertet, welche den Nutzen des Manövers auf Basis der umliegenden Verkehrssituation bewertet. Dabei wird neben der aktuellen auch die vergangene und die in die Zukunft prädiizierte Verkehrssituation betrachtet. Außerdem werden Unsicherheiten in der Umfeldwahrnehmung berücksichtigt.

Ein Beispiel für einen wissensbasierten Ansatz auf der Ebene der Manöverplanung stellt das Konzept von Ulbrich und Maurer (2015) dar. Sie wenden einen teilweise beobachtbaren Markov-Entscheidungsprozess an, um Fahrstreifenwechselentscheidungen zu treffen. In diesem werden mögliche Strategien zur Durchführung von Fahrstreifenwechselvorgängen auf Basis eines sogenannten „belief tree“ gebildet. Der „belief tree“ enthält mögliche Abfolgen von Aktionen wie „Normalfahrt“, „Blinken“, „Fahrstreifen wechseln“ oder „Fahrstreifenwechsel abbrechen“. Jeder Aktion ist ein Belohnungswert zugeordnet. Um die beste Strategie zu finden, werden alle möglichen Strategien durch den „belief tree“ ermittelt und deren Gesamtbelohnung berechnet. Die Strategie mit der höchsten Belohnung wird anschließend ausgewählt und die dafür notwendigen Fahrhandlungen bzw. Manöver an die Trajektorienebene weitergegeben.

Ausgang der Manöverebene ist ein auszuführendes bzw. eine Abfolge von Fahrmanövern. Eine Sammlung von Fahrmanövern für die automatisierte Autobahnfahrt wird später in Kapitel 3 vorgestellt.

Trajektorienebene

Die Aufgabe der Trajektorienebene ist es, auf Basis der Vorgaben eines Fahrmanövers, eine kontinuierliche vom Fahrzeug umsetzbare Bewegung zu erzeugen. Hierbei muss unterschieden werden, ob es sich um eine Trajektorienplanung im engeren Sinne handelt, oder ob die Fahrzeugbewegung durch eine Kombination aus Bahnplanung und Längsführung bewerkstelligt wird. Eine umfangreiche Übersicht über Trajektorien- und Bahnplanungsansätze für das automatisierte Fahren findet sich in Katrakazas, Qudus, Chen und Deka (2015) und Gonzalez, Perez, Milanés und Nashashibi (2016). Die vorgestellten Ansätze unterscheiden sich in mehreren Aspekten. Ein Unterscheidungsmerkmal ist der Planungsraum, welcher die Randbedingungen für eine zu planende Trajektorie beschreibt. Dieser kann auf verschiedenste Art und Weise repräsentiert werden. Beispiele hierfür sind Belegungs- oder Gefahrenkarten sowie Zustandsgitter oder Fahrkorridore. Für die Generierung einer Bahn oder Trajektorie, die durch den Planungsraum an ein bestimmtes Ziel führt, gibt es wiederum eine Vielzahl an Algorithmen. Ein häufig eingesetztes Verfahren ist es, mögliche Fahrzeugbewegungen mittels parametrisch beschriebener Kurven, wie z.B. Klothoiden, Polynomen oder Bézier-Kurven zu beschreiben. Eine Schar solcher Kurven wird anschließend in den Planungsraum gelegt und mittels Kostenfunktionen bewertet und selektiert. Diese Kostenfunktionen berücksichtigen üblicherweise die Abweichung von der Fahrstreifenmitte, die Distanz zu statischen und dynamischen Hindernissen, die Abweichung von einer Zielgeschwindigkeit sowie Fahrdynamik- bzw. Komfortziele wie z.B. die maximal auftretende Beschleunigung oder die Krümmung der Trajektorie (Katrakazas et al., 2015). Die beschriebene Methodik wird dabei sowohl für die Planung zeitbehafteter Trajektorien (Werling, Ziegler, Kammel & Thrun, 2010), als auch für die Bahnplanung ohne Zeitbezug eingesetzt (Wang, Ganjineh & Rojas, 2011). In letzterem Fall wird die Längsführung meist durch reaktive Ansätze zur Abstands- und Geschwindigkeitsregelung realisiert (vgl. Winner & Schopper, 2015; Ardelt & Waldmann, 2011).

Im Folgenden wird exemplarisch der Trajektorienplanungsansatz von Werling et al. (2010) vorgestellt. Zentrale Komponente des darin verwendeten Planungsraums ist die sogenannte Referenzbahn. Diese Referenzbahn beschreibt einerseits das laterale Bewegungsziel, indem sie z.B. in der Mitte eines zu befahrenden Fahrstreifen liegt. Andererseits dient sie gleichzeitig als Koordinatensystem für die Trajektorienplanung, welche in einem Frenét-Raum relativ zur Referenzbahn erfolgt. Die Fahrzeugposition wird folglich

nicht durch kartesische x - y -Koordinaten, sondern durch eine Lauflänge s sowie einen orthogonalen Abstand d relativ zur Referenzbahn beschrieben (siehe Abbildung 2.5). Neben der Referenzbahn enthält der Planungsraum bei Werling et al. (2010) außerdem dynamische Hindernisse wie z.B. andere Fahrzeuge, deren Position ebenfalls in Referenzbahnkoordinaten beschrieben ist. Als mit dem Planungsansatz abbildbare Manöver existieren bei Werling et al. (2010) „Einfädeln“, „Folgen“, „Geschwindigkeit halten“ und „Anhalten“. Sowohl die Referenzbahn als auch die relevanten Hindernisse werden aus dem Umfeldmodell extrahiert. Manöver werden von der Planung lediglich operativ umgesetzt. Die Manöverentscheidung wird durch die Vorgabe eines entsprechenden Planungsraumes aus der überlagerten Manöverebene getroffen.

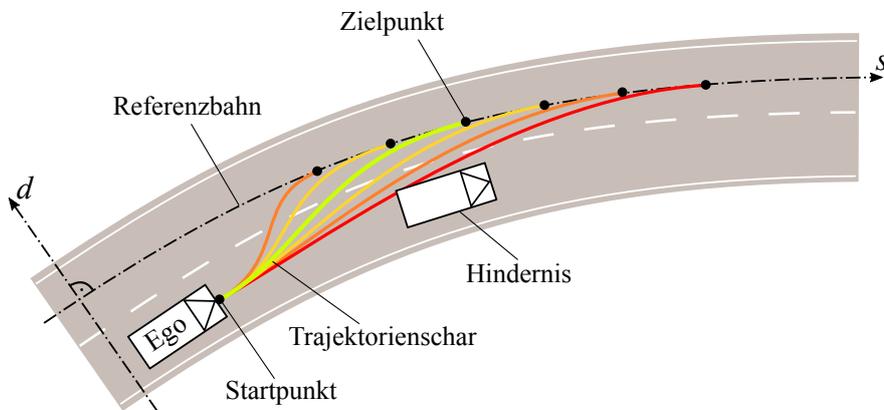


Abbildung 2.5: Trajektorienplanung relativ zu einer Referenzbahn in Anlehnung an Werling et al. (2010)

Ausgehend von den beschriebenen Eingangsdaten werden von einem aktuellen Startpunkt eine Schar von Trajektorien zu einer Menge von Zielpunkten generiert. Dabei wird zwischen Längs- und Querplanung unterschieden. Die Zielpunkte werden, wie in Abbildung 2.5 für die Querplanung ersichtlich, in Referenzbahnkoordinaten (s, d) beschrieben. Die Wahl der Zielpunkte hängt dabei unter anderem vom durchzuführenden Manöver ab. Für beide Richtungen werden in einem ersten Schritt Trajektorien in Form quintischer Polynome generiert. Details zur Berechnung dieser Polynome werden später in Kapitel 4.2.4 beschrieben. Durch die Kombination jeder Längs- mit jeder Quertrajektorie entsteht eine große Menge an Gesamttrajektorien. Aus dieser Gesamtmenge wird mit Hilfe einer Kostenfunktion eine optimale Trajektorie ausgewählt. Die Kosten sind in Abbildung 2.5 durch eine Farbkodierung dargestellt (geringe Kosten grün, hohe Kosten rot). Einflussfaktoren auf die Kosten sind in diesem Beispiel sowohl Komforteigenschaften der Trajektorie wie Beschleunigung und Ruck als auch Sicherheitsaspekte wie die Abweichung von der Referenzbahn sowie der Abstand zu Hindernissen.

Die vom Planungsalgorithmus generierte Bahn- bzw. Trajektorie wird von Referenzbahnkoordinaten zurück in ein kartesisches Koordinatensystem transformiert und an die darunterliegende Stabilisierungsebene übergeben.

Stabilisierungsebene

Die Stabilisierungsebene führt das Fahrzeug entlang der auf Trajektorienplanungsebene geplanten Fahrzeugbewegung. Sie regelt dabei insbesondere Störungen aus, welche nicht in der Planung berücksichtigt sind. Auf Stabilisierungsebene kommen im Allgemeinen fertigkeitbasierte Verhaltensweisen zum Einsatz, die sich durch eine enge Sensor-Aktor-Kopplung auszeichnen. Dies sind üblicherweise klassische Modelle aus der Regelungstechnik in Form von Bahnfolge-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsreglern. Für detailliertere Informationen sei z.B. auf Mayr (2001) oder Kritayakirana und Gerdes (2009) verwiesen.

2.2.3 Zusammenfassung

Die vorhergehenden Abschnitte zeigen, dass die Gesamtfahraufgabe für eine technische Umsetzung üblicherweise in mehrere hierarchisch strukturierte Teilmodule zerlegt wird. Darüber hinaus werden einige Methoden und Modelle der Informationsverarbeitung innerhalb dieser Teilmodule anhand ausgewählter Beispiele aus der Literatur vorgestellt. Eine Unterteilung, die in sehr vielen Architekturentwürfen gewählt wird, ist die Trennung von Wahrnehmung und Verhaltensgenerierung. Auf das Wahrnehmungssystem wird in dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen. Die Verhaltensgenerierung kann hierarchisch weiter unterteilt werden. Funktionale Architekturen aus der Literatur orientieren sich meist an der Drei-Ebenen-Hierarchie von Donges (1982). Allerdings wird die Bahnführungsebene oftmals in eine Manöverebene, welche taktische Fahrentscheidungen trifft, und eine Trajektorienebene, welche diese Entscheidungen operativ umsetzt, unterteilt. Daraus ergeben sich die Hierarchiestufen: Navigationsebene, Manöverebene, Trajektorienebene und Stabilisierungsebene. Innerhalb dieser vier Ebenen läuft die Informationsverarbeitung auf verschiedenen Verhaltensebenen nach Rasmussen (1983) ab. Während auf Stabilisierungsebene so gut wie ausschließlich klassische Ansätze aus der Regelungstechnik eingesetzt werden (fertigkeitbasiert) und die Routingalgorithmen der Navigationsebene der wissensbasierten Verarbeitung zugeordnet werden können, variieren die Ansätze auf Manöver- und Trajektorienebene.

Der Fokus der meisten Veröffentlichungen aus dem Stand der Technik liegt auf der Realisierung eines sicheren, komfortablen und (zeit-)effizienten Fahrverhaltens (vgl. Maurer,

2000, S. 104). Das für die Erreichung dieser Ziele implementierte Verhalten entspricht dabei nicht zwingend dem Verhalten, welches ein menschlicher Fahrer an den Tag legen würde. Als Beispiel kann der Verlauf der gewählten Bahn beim Fahrstreifenwechselmanöver genannt werden. Sporrer, Prell, Buck und Schaible (1998), Salvucci und Liu (2002) und auch Freyer (2008) belegen, dass der menschliche Fahrer eine asymmetrische Bahn vom Start- auf den Zielfahrstreifen wählt. Das bedeutet, dass die Bahn beim Auslenken aus dem Startfahrstreifen eine höhere Krümmung aufweist als beim Zurücklenken in den Zielfahrstreifen. In den in der Literatur beschriebenen Ansätzen werden häufig geometrische Kurven verwendet, die diesen asymmetrischen Verlauf gar nicht abbilden können. Darüber hinaus sind derartige Aspekte auch nicht in den von Katrakazas et al. (2015) zusammengefassten Kostentermen enthalten. Elbanhawi, Simic und Jazar (2015) greifen diese Thematik für die Gestaltung des Bewegungsverhaltens automatisierter Fahrzeuge auf und unterstreichen die Bedeutsamkeit von menschlichen Faktoren auf Verhaltensgenerierungsebene, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

2.3 Mensch und Automation

Im vorherigen Abschnitt wurden Ansätze beschrieben, die den Fahrer durch die Automation ersetzen. Die meisten Automobilhersteller arbeiten dahingegen aktuell an einer inkrementellen Einführung automatisierter Fahrfunktionen. Begonnen hat dieser Prozess, wie in der Einleitung beschrieben, mit Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer in bestimmten Teilaspekten der Fahrzeugführung unterstützen. Gegenwärtig ist ein Punkt erreicht, an dem Systeme auf den Markt drängen, die zwar in bestimmten Situationen die gesamte Fahraufgabe übernehmen können, jedoch noch vom Fahrer überwacht werden müssen. Bis die Technik so weit ist, dass der Mensch nur noch „Transportgut“ in einem selbstfahrenden Fahrzeug ist, bleibt das Zusammenspiel zwischen Mensch und Automationssystem ein wichtiger Aspekt des automatisierten Fahrens. In Abbildung 2.6 sind in diesem Sinne sowohl der Mensch, als auch die Automation in den Regelkreis der Fahrzeugführung eingebunden. Die Interaktion der beiden ist über die mittig eingezeichnete Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) symbolisiert. Der große Block „Informationsverarbeitung“ ist stellvertretend für die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Fahrermodelle zu sehen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst mögliche Aufgabenverteilungen zwischen Mensch und Automation erläutert und auf übliche Taxonomien zur Einteilung von Automationssystemen eingegangen. Im Anschluss daran wird eine neue Aufgabe des Menschen beschrieben, welche insbesondere in den automatisiert fahrenden Fahrzeugen

der nahen Zukunft von großer Relevanz sein wird: Die Überwachung des Automationsystems.

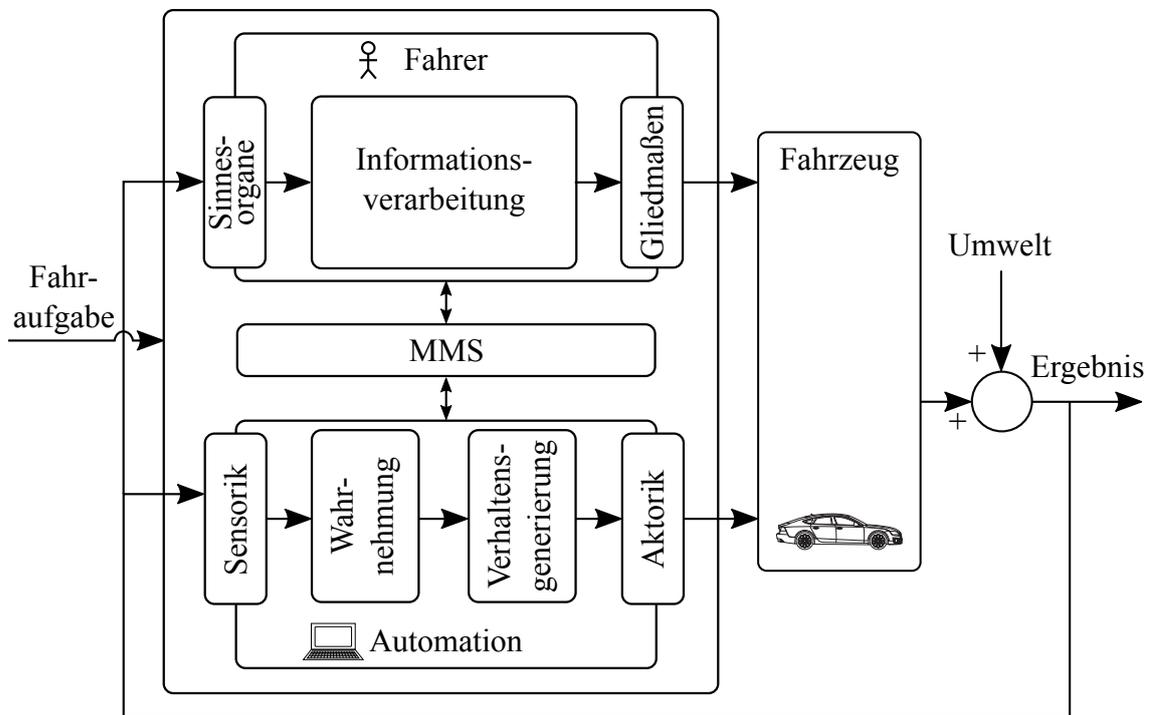


Abbildung 2.6: Gesamtsystemdarstellung aus Fahrer, Automation und Fahrzeug

2.3.1 Aufteilung der Fahraufgabe

Damit Mensch und Automationssystem die Fahraufgabe erfolgreich gemeinsam bewältigen können, ist es notwendig, diese in einzelne Teilaufgaben oder -prozesse zu unterteilen, die den beiden Akteuren zugeordnet werden können. Die Entwicklung von Systematiken oder mehrdimensionalen Ordnungsschemata ist zentraler Bestandteil vieler Forschungsaktivitäten, die sich mit dem Zusammenspiel von Mensch und Maschine befassen. In diesem Abschnitt werden einige gängige Ansätze aus der Literatur vorgestellt, um die möglichen Dimensionen der Kooperation zwischen Fahrer und Fahrzeug zu verdeutlichen.

Hierarchische Aufteilung der Fahraufgabe Das bereits ausführlich behandelte Dreiebenenmodell von Donges (1982) ist eine mögliche Dimension, entlang derer sich die Fahraufgabe unterteilen lässt. Die heutzutage in jedem Neuwagen verbaute ESC lässt sich hier bereits konsistent einordnen. Sie stellt eine Automatisierung auf der untersten

Ebene der Fahraufgabe dar, indem sie das Fahrzeug durch gezielte Bremsingriffe stabilisiert. Ein weiteres Beispiel für eine hierarchische Aufteilung der Fahraufgabe stellt das Konzept Conduct-by-Wire dar (Winner & Hakuli, 2006). Hier wird die Stabilisierungs- und Trajektorienebene von der Automation ausgeführt und der Fahrer handelt nur noch auf Navigations- und Manöverebene. Der Fahrer steuert das Fahrzeug, indem er der Automation Manöverkommandos gibt.

Sequentielle Aufteilung der Fahraufgabe Versucht man das Fahrerassistenzsystem „Spurverlassenswarner“ in das gleiche Schema einzuordnen, fällt auf, dass das Modell von Donges (1982) hier bereits an seine Grenzen stößt. Dies liegt daran, dass das System den Fahrer zwar auf der Bahnführungsebene warnt bzw. informiert, jedoch nicht aktiv in die Fahrzeugführung eingreift. Für die Einordnung warnender und informierender Assistenzsysteme wird daher häufig eine weitere Dimension betrachtet. Es handelt sich um den Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung, der sich in die drei sequentiell ablaufenden Teilprozesse „Informationsaufnahme“, „Informationsverarbeitung“ und „Informationsumsetzung“ unterteilen lässt (vgl. z.B. Bubb, 1993). Eine Einordnung des Spurverlassenswarners, die diese zusätzliche Dimension betrachtet, ist beispielsweise bei Damböck (2013, S. 38) zu finden. Das System wird hier der Bahnführungsebene zugeordnet und übernimmt dort die Informationsaufnahme und -verarbeitung. Die letztendliche Informationsumsetzung bleibt aber nach wie vor beim Fahrer.

Aufteilung nach der Bewegungsrichtung Eine weitere Dimension, die hauptsächlich auf den unteren Ebenen der Fahrzeugführung eine Rolle spielt, ist die Unterscheidung in Längs- und Querrichtung. So erfolgt die Informationsumsetzung eines ACC Systems ausschließlich in Fahrzeuginnenrichtung.

Aufteilung anhand von Entscheidungsprozessen Insbesondere bei Konzepten, die eine tiefere Kooperation zwischen Fahrer und Fahrzeug verfolgen, haben sich zusätzliche Differenzierungen etabliert. So orientieren sich beispielsweise Sheridan und Verplank (1978) und darauf aufbauend Endsley und Kaber (1999) an einem gemeinsamen Entscheidungsprozess, der die Generierung und Auswahl mehrerer Handlungsalternativen beinhaltet. Es werden 10 Stufen unterschieden, die von Stufe 1: *Der Fahrer macht alles*, bis hin zu Stufe 10: *Der Computer macht alles*, reichen. Dazwischen wird unterschieden, ob der Computer dem Menschen nur Handlungsalternativen vorschlägt und die Entscheidung und Umsetzung beim Menschen bleibt, ob der Computer eine Entscheidung trifft und lediglich die Umsetzung dem Menschen überlässt oder ob der

Computer die getroffene Entscheidung auch umsetzt und den Menschen nur noch informiert.

Dynamische und parallele Aufgabenverteilung Die Aufteilung von Teilaufgaben zwischen Mensch und Maschine muss keineswegs statisch sein. So wird beispielsweise von Hoc (2001) eine dynamische Aufgabenverteilung vorgeschlagen, die sich je nach Belastung des Menschen verändert. Des Weiteren muss eine Teilaufgabe auch nicht exklusiv dem Fahrer oder der Automation im Sinne von „wer macht was?“ zugeordnet sein. Es existieren auch Konzepte, die eine gemeinsame Ausführung von Teilaufgaben berücksichtigen. Dies kann bedeuten, dass Fahrer und Fahrzeug beispielsweise im „mutual control mode“ von Hoc, Young und Blossville (2009) die Fahrzeugführung bis zur untersten Ebene gemeinsam und parallel ausführen (vgl. auch Flemisch et al., 2003). Alternativ ist es ebenfalls denkbar, dass das Fahrzeug die gesamte Fahraufgabe eigenständig ausführt, der Fahrer aber parallel dazu noch „mitdenkt“, also im Sinne der Ebenen der Informationsverarbeitung die Informationsaufnahme und -verarbeitung parallel stattfindet und lediglich die Informationsumsetzung exklusiv beim Fahrzeug liegt.

2.3.2 Systemgrenzen

Ein sehr wichtiger Aspekt der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen sind Systemgrenzen. Damit sind die Grenzen des Bereichs gemeint, innerhalb dessen die Automation die ihr zugeordneten Teilaufgaben übernehmen soll und kann. Wird eine solche Grenze überschritten, muss der Mensch die Fahrzeugführung übernehmen. Eine Systemgrenze kann sowohl geografisch z.B. in Form einer freigegebenen Strecke als auch funktional z.B. durch ein Maximalgeschwindigkeit oder eine Menge an beherrschten Fahrmanövern gezogen sein. Zur Verdeutlichung kann ein System zur automatisierten Staufahrt betrachtet werden. Befindet sich das Fahrzeug in einer Stausituation, so kann die Automation die Fahrzeugführung vollständig übernehmen. Kommt das Fahrzeug an den Punkt, an dem sich der Stau wieder auflöst, so ist in diesem Moment eine Systemgrenze erreicht und der Fahrer muss die Fahraufgabe wieder übernehmen. Die Wahl der Systemgrenzen selbst, die Kommunikation dieser an den Fahrer sowie die Gestaltung des Verhaltens der Automation in der Nähe dieser Grenzen, stellt einen essentiellen Aspekt der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen dar.

In diesem Zusammenhang ergibt sich eine weitere Dimension, die bei der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine eine Rolle spielt. Es geht darum, ob die Automation ihre Grenzen selbst erkennt und wenn ja, mit welcher örtlichen oder zeitlichen Vorausschau. Hinzu kommt die Frage, wie sich das Überschreiten der Systemgrenze

deutlich macht: Kommt es z.B. zu einem Fehlverhalten, einer Deaktivierung des Systems oder zum selbständigen Übergang in einen risikominimalen Zustand.

2.3.3 Taxonomien zur Klassifikation von Automationssystemen

Auch wenn die in den vorherigen Abschnitten genannten Schemata bei weitem nicht den gesamten Stand der Forschung abdecken, verdeutlicht die getroffene Auswahl bereits die große Dimension des Konfigurationsraums für die Gestaltung einer Kooperation zwischen Mensch und Automation. Selbst wenn viele der theoretisch denkbaren Konfigurationen in der Praxis nicht realisierbar oder aus bestimmten Gründen nicht sinnvoll sind, bleibt ein enormer Gestaltungsspielraum bestehen. Um in der Vielzahl an möglichen Systemausprägungen eine vergleichsweise einfache Einteilung und Vergleichbarkeit von Systemen für das automatisierte Fahren zu ermöglichen, wurden in den vergangenen Jahren in mehreren Institutionen und Konsortien Taxonomien für die Einteilung automatisierter Fahrfunktionen entwickelt.

Eine vor allem im deutschsprachigen Raum weit verbreitete Taxonomie ist die der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Sie differenziert die fünf Automatisierungsgrade „Driver Only“, „Assistiert“, „Teilautomatisiert“, „Hochautomatisiert“ und „Vollautomatisiert“. Tabelle 2.2 enthält die Beschreibung zu den fünf Stufen aus Gasser (2012). Die fünf Stufen unterscheiden sich hinsichtlich der Bewegungsrichtung (Längs- und Querführung), der Verfügbarkeit des Fahrers als Überwacher und Rückfallebene sowie der Erkennung von Systemgrenzen durch die Automation. In der Stufe „Driver Only“ führt der Fahrer sowohl Längs- als auch Querführung selbst aus. Bei der assistierten Fahrt übernimmt die Automation entweder die Längs- oder die Querführung. Der Fahrer muss das System jedoch dauerhaft überwachen, Systemgrenzen erkennen und an diesen die Fahraufgabe wieder übernehmen. Bei der teilautomatisierten Fahrt werden sowohl Längs- als auch Querführung vom Fahrzeug übernommen, der Fahrer ist jedoch nach wie vor in der Rolle des Überwachers. Erst bei der Hochautomation ist eine dauerhafte Überwachung nicht mehr notwendig, da das System sämtliche Grenzen selbst erkennt. Im Falle einer erkannten Systemgrenze muss der Fahrer die Fahrzeugführung jedoch mit einer ausreichenden Zeitreserve nach wie vor wieder übernehmen. In der Vollautomation ist selbst dieser Übernahme nicht mehr zwingend nachzukommen, da das System in der Lage ist, aus sämtlichen Situationen in einen risikominimalen Zustand überzugehen.

Im englischsprachigen Raum erfreut sich die Taxonomie der Society of Automotive Engineers (SAE) großer Beliebtheit. Diese ist mit der BASt-Definition größtenteils deckungsgleich, führt jedoch noch einen sechsten Automationsgrad ein, welcher erfordert, dass

Tabelle 2.2: Automationsstufen der BASt nach Gasser (2012)

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung Fahrer
Driver Only	<p>Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.</p>
Assistiert	<p>Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.
Teil-automatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für eine gewisse Zeit und/oder in spezifischen Situationen).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.
Hoch-automatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen. • Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. • Systemgrenzen werden alle vom System erkannt (z.T. vom System abgefangen, z.T. muss der Fahrer übernehmen). • Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen.
Voll-automatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen. • Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf. • Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. • Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen.

ein System alle Fahrsituationen beherrscht, die auch ein menschlicher Fahrer bewältigen kann (SAE, 2016). Ein System, welches lediglich die automatisierte Autobahnfahrt beherrscht, würde beispielsweise nicht in diese Stufe fallen. Eine ebenfalls sechsstufige Unterteilung, welche zur BAST- als auch SAE-Definition kompatibel ist, stellt die Taxonomie des Verbands der Automobilindustrie (VDA) dar (VDA, 2015). Der Vollständigkeit halber sei außerdem die Taxonomie der US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit (NHTSA, 2013) genannt, welche jedoch vor allem in den höheren Automationsstufen von den drei zuvor genannten Taxonomien abweicht.

Die beschriebenen Taxonomien ermöglichen die Klassifikation kontinuierlich wirkender Automationssysteme (Kategorie B, nach Gasser, Seeck und Smith (2015)) und erleichtern deren Vergleichbarkeit. Dennoch erfassen sie nicht das gesamte Spektrum automatisierter Fahrfunktionen. Insbesondere werden Sicherheitssysteme, welche für einen kurzen Zeitraum zur Unfallvermeidung eingreifen, wie beispielsweise ein Notbremsassistent, nicht abgedeckt (Kategorie C, nach Gasser et al. (2015)). Außerdem fällt es schwer, Systeme mit einer dynamischen Aufgabenverteilung konsistent einzuordnen. Beispielsweise ist ein System denkbar, das auf der Autobahn hoch- oder sogar vollautomatisiert in einem Fahrstreifen fahren kann, im Falle eines Fahrstreifenwechselmanövers jedoch darauf angewiesen ist, dass der Fahrer den rückwärtigen Verkehr überwacht und das Manöver freigibt. Es wäre für dieses Manöver folglich nur eine Teilautomation. Des Weiteren wird die Interaktion zwischen Fahrer und Automation so gut wie nicht betrachtet. Ein System, welches die gesamte Fahraufgabe selbständig ausführt, aber dauerhaft überwacht werden muss, fällt in die gleiche Stufe wie ein System nach dem bereits erwähnten Conduct-by-Wire Ansatz (Winner & Hakuli, 2006), das mit dem Fahrer in Form von Manöverkommandos interagiert.

2.3.4 Der Mensch als Überwacher der Automation

Die Automatisierung der Fahraufgabe führt zu einer Entlastung des Fahrers, indem ihm ein Teil seiner Aufgaben von der Automation abgenommen wird. Solange die Automation jedoch nicht die gesamte Fahraufgabe übernimmt und darüber hinaus Systemgrenzen existieren, welche die Automation selbst nicht rechtzeitig erkennt, um dem Fahrer eine ausreichende Übernahmezeit zu gewähren, kommt für den Fahrer eine neue Aufgabe hinzu: Die Überwachung des Automationssystems.

Gemäß SAE (2016) kann die Überwachungsaufgabe in die Überwachung des Umfelds, die Überwachung des Fahrzeugs und die Überwachung des Automationssystems unterteilt werden. Bei der Überwachung des Automationssystems unterscheidet die SAE (2016) zwischen den Begriffen „monitoring“ und „supervising“. Dabei beinhaltet „su-

pervising“ sowohl „monitoring“ als auch das Eingreifen des Fahrers im Falle eines Fehlverhaltens des Systems. Othersen (2016) beschreibt die Überwachungsaufgabe als die „visuelle Kontrolle der Situation, das Verstehen und Antizipieren der Informationen sowie die Detektion eines Übernahmbedarfs im Falle von Systemgrenzen und -fehlern“

Die Überwachung eines komplexen technischen Systems stellt den Menschen vor eine nicht zu unterschätzende Aufgabe. Bainbridge (1983) nennt dies die Ironie der Automation. Obwohl die Automation den Menschen entlastet soll, bringt sie ihn unter Umständen in deutlich anspruchsvollere Situationen, als eine vollständig manuelle Ausführung dies täte. Dem Menschen fällt es schwer in einem reizarmen Umfeld für längere Zeit aufmerksam zu bleiben (z.B. Mackworth, 1948). Dies führt zwangsläufig zu einem nachlassenden Situationsbewusstsein (vgl. Abschnitt 2.1.3), welches für die Erkennung von Fehlern der Automation sowie die Übernahme im Fall eines Fehlers essentiell ist. Darüber hinaus führt die reine Überwachung des Automationssystems dazu, dass die manuellen Fähigkeiten des Menschen, welche er insbesondere in kritischen Übernahme-situationen benötigen würde, nachlassen (Bainbridge, 1983).

Betrachtet man das Konstrukt des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995), so spielt im Kontext des automatisierten Fahrens neben dem Bewusstsein über die Elemente der Umgebung, insbesondere das Bewusstsein über das Automationssystem eine entscheidende Rolle. Der überwachende Fahrer muss sich über den Zustand, die Absichten sowie die Fähigkeiten und Grenzen der Automation im Klaren sein. Diese Teilkomponente des Situationsbewusstseins wird in der Literatur als „Mode-Awareness“ (Sarter & Woods, 1995) oder auch „Systembewusstsein“ (Othersen, 2016) bezeichnet. Nur wenn der Fahrer sich des Zustands und der Fähigkeiten des Systems bewusst ist, kann er entscheiden, ob das System eine vorliegenden Situation korrekt interpretiert und richtig darauf reagiert.

Damit der Mensch die Überwachungsaufgabe erfolgreich bewältigen kann, ist es vor allem notwendig, sein Situations- und Systembewusstsein zu fördern. In der Literatur werden hierfür mehrere Lösungen vorgeschlagen. Eine Möglichkeit ist es, auch einen überwachenden Fahrer noch durch eine entsprechende Interaktionsgestaltung in die Fahrzeugführung einzubinden. Möglichkeiten hierfür finden sich z.B. bei Flemisch et al. (2003), Winner und Hakuli (2006), Albert, Wimmer und Bengler (2014), Flemisch et al. (2014) oder Cramer et al. (2015). Eine weitere bzw. diese Interaktion unterstützende Maßnahme ist es, dem Fahrer adäquate Rückmeldung zu geben (Norman, 1990; Sarter & Woods, 1995; Kolbig & Müller, 2013). Diese Rückmeldung kann sowohl Informationen über das Umfeld des Fahrzeugs beinhalten, als auch Informationen über interne Zustände und Absichten der Automation. Vor allem Letzteres trägt erheblich zu einem besseren Systembewusstsein des Fahrers im Gesamtsystem aus Mensch, Automation

und Fahrzeug bei. Laut Norman (1990) sind unangemessene Rückmeldung und Interaktion sogar die Hauptursachen vieler Probleme, die die zunehmende Automatisierung mit sich bringt.

2.3.5 Zusammenfassung

Die vorherigen Abschnitte geben einen Überblick über das große Spektrum möglicher Automationssystemausprägungen zwischen den beiden Extremen *manuelle Fahrt* und *vollautomatisierte Fahrt*. In den kommenden Jahren werden vor allem teil- und hochautomatisierte Systeme (vgl. Gasser, 2012; SAE, 2016) marktreif, die den Menschen als dauerhaft verfügbaren Überwacher oder zumindest Rückfallebene benötigen. Wenn gleich man sich durch die teil- bzw. zeitweise Abgabe der Fahrzeugführung eine Entlastung des Fahrers verspricht, stellt die neue Rolle des Überwachers und der Rückfallebene hohe Anforderungen an die Aufmerksamkeit sowie das Situations- und Systembewusstsein des Fahrers. Um den Menschen in diesen Aspekten zu unterstützen, wird in der Literatur vor allem eine Einbindung des Fahrers in Form der Interaktion mit dem Automationssystem sowie die adäquate Rückmeldung von Informationen des Automationssystems an den Fahrer gefordert.

2.4 Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung

Die Überwachungsaufgabe ist einer der Hauptaspekte der neuen Rolle des Fahrers, vor allem in einem teilautomatisiert fahrenden Fahrzeug. Gemäß dem bereits bekannten menschlichen Informationsverarbeitungsprozess wie er z.B. in Bubb (1993) beschrieben wird, ist die Informationsaufnahme eine Grundvoraussetzung für die Überwachung des Fahrzeugverhaltens. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die menschliche Sinneswahrnehmung und geht dabei insbesondere auf die Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung durch den Fahrer ein.

2.4.1 Grundlagen

Goldstein (2008) beschreibt den Wahrnehmungsprozess in Form mehrere kreisförmig angeordneter Einzelschritte. Im Prozess führen Reize bzw. Stimuli an Sensoren über Verarbeitungsprozesse zu perzeptuellen Antworten. Am Ende steht die Handlung, welche wiederum die Stimuli beeinflusst und den Kreis dadurch schließt.

Im täglichen Sprachgebrauch wird beim Stichwort Wahrnehmung meist von den fünf Sinnen des Menschen gesprochen. Darunter wird das Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen verstanden. Hierbei handelt es sich um eine sehr einfache Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung. Etwas differenzierter betrachtet, besitzt der Mensch mehrere Sinnessysteme, die entsprechende Empfindungen vermitteln. Grundtypen von Empfindungen wie z.B. Sehen, Hören, Riechen oder Schmecken werden als Sinnesmodalitäten bezeichnet (Handwerker, 2006). Empfindungen beginnen mit der Erregung von Sensoren. Dabei unterscheidet Handwerker (2006) Sensoren für chemische, thermische und mechanische Reize sowie Sensoren für Licht. Durch die Weiterverarbeitung der Stimuli an den Sensoren im entsprechenden Sinnessystem entstehen Empfindungen. Sowohl bei Goldstein (2008), als auch bei Handwerker (2005) wird aus einer Empfindung erst durch die Einbringung von Erfahrung bzw. Wissen eine Wahrnehmung (Handwerker, 2005, S. 274).

Hinsichtlich der Sinnesmodalitäten Sehen, Hören, Riechen und Schmecken sind die Begrifflichkeiten in der Literatur im Allgemeinen klar und eindeutig. Für das Fühlen existieren jedoch vielfältige Begriffe und Subkategorien, die teilweise widersprüchlich verwendet werden. Grund dafür ist vermutlich, dass hier eine eindeutige Zuordnung eines Sinnesorgans zu einer Modalität (z.B. Auge - Sehen) schwerer fällt. Eine mögliche Einteilung gemäß R. F. Schmidt, Schaible und Birbaumer (2006) ist in Tabelle 2.3 zu sehen. Sowohl im somatosensorischen, als auch im vestibulären System werden Informationen einer Vielzahl von Sensoren in der Haut, den Sehnen, Muskeln und Gelenken verarbeitet. Insbesondere ist der sogenannte Vestibularapparat hervorzuheben, der sich im Innenohr befindet und die Wahrnehmung von Translations- und Rotationsbeschleunigungen in allen drei Raumrichtungen ermöglicht. Es ist allerdings zu betonen, dass Informationen, die zu Bewegungs- und Lageempfindungen führen, zwar hauptsächlich aus dem Vestibularapparat stammen, aber durch Informationen des visuellen und somatosensorischen Systems ergänzt werden (Zenner, 2005, S.358).

2.4.2 Relevante Sinnessysteme für die Fahrzeugführung

Bubb (2015b) spricht von vier Wahrnehmungsarten, die für das Führen eines Kraftfahrzeugs von Bedeutung sind. Diese sind die „optische“, „akustische“, „kinästhetische“ und „haptische Wahrnehmung“. Während die ersten beiden Arten den sinnesphysiologischen Begrifflichkeiten (visuelles und auditorisches System) von R. F. Schmidt, Lang und Thews (2005) zugeordnet werden können, sind die Begriffe „kinästhetische Wahrnehmung“ und „haptische Wahrnehmung“ in der Literatur nicht eindeutig definiert. Bubb (2015b, S. 101) geht auf diese Problematik ein und gibt daraufhin eine Definition dieser Begriffe. Da diese Definition jedoch nahezu identisch zu den allgemeinen sinnesphysio-

Tabelle 2.3: Detaillierung des Sinnes „Fühlen“ nach R. F. Schmidt et al. (2006)

Somatosensorisches System	
Tastsinn:	Ertasten von Gegenständen, Druck, Berührung und Vibration
Tiefensensibilität / Propriozeption:	Kraftsinn, Stellung und Bewegung einzelner Körperteile
Temperatursinn:	Temperatur von Gegenständen, Warm- und Kaltempfinden
Viszerozeption:	Organtätigkeiten
Vestibuläres System	
Gleichgewichtssinn:	Translations- und Rotationsbeschleunigungen, Wahrnehmung der Körperhaltung

logischen Begrifflichkeiten nach R. F. Schmidt et al. (2006) aus Tabelle 2.3 ist, werden im Rahmen dieser Arbeit die Begriffe aus der Sinnesphysiologie verwendet. Deren Definition wird in Anlehnung an Bubb (2015b) für den Kontext der Fahrzeugführung spezifiziert und ist in Tabelle 2.4 zusammen mit den anderen für die Fahrzeugführung relevanten Sinnen aufgeführt.

Aufgrund der für diese Arbeit getroffenen Annahme eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs, das sowohl die Längs- als auch die Querführung auf operativer Ebene vollständig übernimmt, wird angenommen, dass der Fahrer während der automatisierten Fahrt keinen dauerhaften Kontakt zu den primären Bedienelementen (Lenkrad, Gaspedal und Bremse) hat. Daher spielen der Tastsinn sowie die Tiefensensibilität im Kontext dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle bei der Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung. Des Weiteren wird dem auditiven Sinnessystem ebenfalls eine geringere Bedeutung für die Wahrnehmung der automatisierten Fahrzeugbewegung beigemessen und es wird daher von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Es verbleibt damit die visuelle und vestibuläre Wahrnehmung als relevanteste Modalitäten für die Beobachtung der Fahrzeugbewegung. Für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem vestibulären Sinnessystem. Die visuelle Wahrnehmung wird nur insofern betrachtet, als dass sie, wie in Tabelle 2.4 beschrieben, einen Beitrag zur Bewegungswahrnehmung im vestibulären System liefert. Die vom Fahrer mit dem vestibulären Sinnessystem beobachtete Größe ist die Eigenbewegung seines Körpers. Da der Fahrer über den Sitz mit dem Fahrzeug verbunden ist, entspricht diese in den meisten Fällen auch der Eigenbewegung des Fahrzeugaufbaus. Die Fahrzeug- bzw. Aufbaubewegung wird in dem in Abbildung 2.7 dargestellten Koordinatensystem beschrieben. Sie setzt sich aus Translations-

Tabelle 2.4: Sinnessysteme und wahrgenommene fahrrelevante Information

Sinnessystem	Beschreibung und Beispiel
Visuell	<p>Mit den Augen wahrgenommenes Umfeld innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs.</p> <p>Beispiel: Wahrnehmung von Infrastrukturelementen (Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen) und anderen Verkehrsteilnehmern sowie deren Position und Ausrichtung, Ablesen von Anzeigeelementen (Tachometer).</p>
Auditiv	<p>Mit den Ohren wahrgenommenes Umfeld in und außerhalb des Fahrzeugs</p> <p>Beispiel: Wahrnehmen von Wind- und Abrollgeräuschen, Informations- und Warntönen (Blinkersignal), dem Motorgeräusch oder Geräuschen aus dem Umfeld (Hupen, Martinshorn).</p>
Vestibulär	<p>Wahrnehmung der Eigenbewegung des Körpers durch Verarbeitung von Informationen des Vestibularapparats, der Mechanosensoren in Haut, Muskeln und Gelenken sowie auch visueller Information. Für geübte Fahrer beinhaltet dies auch die adäquate Interpretation von Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs sowie auf den Körper wirkenden Kräften an Sitz und Lenkrad.</p> <p>Beispiel: Wahrnehmung einer Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs.</p>
Somatosensorisch - Tiefensensibilität	<p>Wahrnehmung der Körperhaltung und -bewegung sowie Kraftwahrnehmung unabhängig von äußeren Krafteinwirkungen z.B. durch Trägheitskräfte. Dazu werden Informationen aus sehr ähnlichen Sensoren wie für den Gleichgewichtssinn verarbeitet.</p> <p>Beispiel: Wahrnehmung der Gaspedalstellung oder Bremspedalkraft.</p>
Somatosensorisch - Tastsinn	<p>Wahrnehmung der Form und Oberflächenkonsistenz berührter Objekte sowie Druck und Vibration. Es werden Informationen von Mechanosensoren in Haut, Muskeln und Gelenken sowie von Thermosensoren in der Hautoberfläche verarbeitet.</p> <p>Beispiel: Ertasten eines Bedienelementes oder Wahrnehmung einer Lenkradvibration.</p>

und Rotationsbewegungen in allen drei Raumrichtungen zusammen. Da im Rahmen dieser Arbeit keine hochdynamischen Fahrmanöver betrachtet werden, beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf Translationsbewegungen in x - und y -Richtung sowie Rotationsbewegungen um die z -Achse des Fahrzeugs (Gierachse).

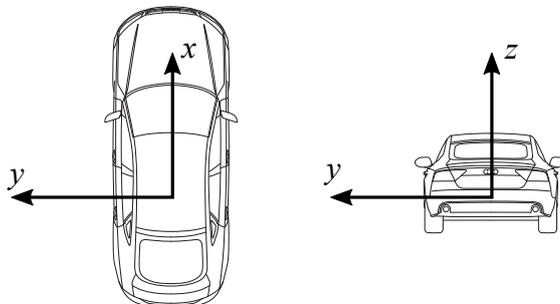


Abbildung 2.7: Koordinatensystem für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung

2.4.3 Wahrnehmungsschwellen

Wahrnehmungsschwellen sind ein zentraler Bestandteil der Wahrnehmungspsychologie. Hierbei wird zwischen der Absolutschwelle und der Unterschiedschwelle differenziert. Erstere beschreibt die kleinste Reizintensität, die noch zu einer Empfindung führt. Ist die Intensität oberhalb dieser Schwelle, so spricht man von einem überschwelligen Reiz. Die Unterschiedschwelle beschreibt den minimalen Intensitätsunterschied, den ein Reiz gegenüber einem Referenzreiz aufweisen muss, damit er als größer bzw. kleiner empfunden wird. Etwas generalisierter betrachtet, ist damit die Absolutschwelle die Unterschiedschwelle für einen Referenzreiz mit der Intensität Null. Unterschiedsschwellen hängen von vielerlei Faktoren, wie der Art des Sinnessystems, der Reizdauer, dem Reizkontext, dem wahrnehmenden Individuum sowie der Intensität des Referenzreizes ab (Handwerker, 2006; Bubb, 2015b). Hinsichtlich des letzten Faktors besagt beispielsweise das Weber-Gesetz, dass die Unterschiedschwelle mit der Intensität des Referenzreizes zunimmt (Handwerker, 2006).

Wahrnehmungsschwellen liefern keine exakte Aussage darüber, ob ein Reiz wahrgenommen wird oder nicht. Das Resultat wissenschaftlicher Untersuchungen ist vielmehr eine Kurve, auf der die Entdeckungswahrscheinlichkeit über der Reizintensität bzw. dem Intensitätsunterschied aufgetragen ist. Die Kurve wird psychometrische Funktion genannt. Im Allgemeinen wird als Wahrnehmungsschwelle die Reizintensität verstanden, bei der die Wahrscheinlichkeit für die Entdeckung des Reizes 50 % beträgt (Handwerker, 2006, S. 197). Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über Wahrnehmungsschwel-

len der Eigenbewegungswahrnehmung. Wenn nicht näher spezifiziert, handelt es sich bei den angegebenen Werten um Absolutschwellen.

Unter Eigenbewegung werden absolute, also relativ zur „Welt“ gesehene, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten verstanden. Zur Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen für Beschleunigungen wurden bereits eine Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt. Neben Realfahrzeugstudien im Automobilkontext stammen die Ergebnisse vornehmlich aus, in Linearsitzschlitten durchgeführten Studien, der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizin. Eine Übersicht über Wahrnehmungsschwellen im Automobil, die sowohl Translations- als auch Rotationsbeschleunigungen beinhaltet, liefern Heißing, Kudritzki, Schindlmaister und Mauter (2000). Die darin angegebenen Schwellenwerte wurden „durch diverse durchgeführte Versuche und unter Zuhilfenahme der Literatur“ (Heißing et al., 2000) ermittelt und bewegen sich in einem sehr großen Intervall. So rangiert die Wahrnehmungsschwelle für Längsbeschleunigungen im Bereich $0,02 - 0,8 \text{ m/s}^2$, für Querschleunigungen $0,05 - 0,1 \text{ m/s}^2$ und für Rotationsbeschleunigungen um die Gierachse bei $0,05 - 5 \text{ }^\circ/\text{s}^2$. Die Ursache für die Spannweite dieser Werte liegt mutmaßlich in den sehr unterschiedlichen Versuchsbedingungen, unter denen diese Werte entstanden. Aus diesem Grund wird im Folgenden nochmals im Detail auf einige Untersuchungen eingegangen.

Translationsbeschleunigung Müller (2015) gibt eine ausführliche Übersicht über existierende Forschung zu Wahrnehmungsschwellen von Translationsbeschleunigungen und führt selbst mehrere Studien zur Wahrnehmung von Längsbeschleunigungen im Fahrzeug durch. Die von Müller (2015) zusammengefassten Ergebnisse aus der Literatur bewegen sich, ähnlich wie bei Heißing et al. (2000), in einem sehr breiten Band von $0,02 - 0,78 \text{ m/s}^2$. Exemplarisch sei eine medizinisch motivierte Studie von Kingma (2005) genannt. In dieser werden die Probanden auf einem Linearsitzschlitten mit verbundenen Augen und Geräuschschutzhörern auf den Ohren sinusförmig (Frequenz 1 Hz) in Längs- und Querrichtung bewegt. Dabei werden Absolutschwellen von $0,085 \text{ m/s}^2$ für Längs- und $0,088 \text{ m/s}^2$ für Querschleunigungen ermittelt. Müller (2015) selbst ermittelt in Realfahrzeugstudien die in Tabelle 2.5 dargestellten Unterschiedsschwellen (Referenzreiz bei $2,2 - 3,3 \text{ m/s}^2$). Im Versuch führen die Probanden dafür als Fahrer mehrere Vollastbeschleunigungsvorgänge auf einer geraden Strecke durch. Die Maximalbeschleunigung wird durch Anpassungen am Motorsteuergerät variiert. Müller (2015) untersucht außerdem den Einfluss von Fahrgeschwindigkeit, Motorgeräusch und mentaler Beanspruchung auf die Wahrnehmungsschwellen und kann keine signifikanten Unterschiede feststellen.

Tabelle 2.5: Unterschiedsschwellen für Beschleunigungen in Fahrzeuginnenrichtung nach Müller (2015)

Entdeckungswahrscheinlichkeit	Beschleunigungserhöhung	Beschleunigungsreduktion
50 %	$0,12 \text{ m/s}^2$	$0,08 \text{ m/s}^2$
80 %	$0,18 \text{ m/s}^2$	$0,14 \text{ m/s}^2$
100 %	$0,40 \text{ m/s}^2$	$0,40 \text{ m/s}^2$

Rotationsbeschleunigungen Eine weitere Übersicht über Wahrnehmungsschwellen im Allgemeinen und Schwellenwerte für Rotationsbeschleunigung im Speziellen findet sich in Wolf (2009). Dieser bezieht sich auf eine Literaturübersicht von Guedry (1974). Die Ergebnisse aus den dort zusammengefassten Studien variieren teils um bis zu zwei Zehnerpotenzen ($0,035^\circ/\text{s}^2$ - $4,0^\circ/\text{s}^2$). Gemäß Wolf (2009) liegt der Median der in den Studien ermittelten mittleren Wahrnehmungsschwelle für Gierbeschleunigungen bei $0,63^\circ/\text{s}^2$. Der Grund für die in den Studien teils stark variierenden Ergebnisse könnte die bereits erwähnte Abhängigkeit der Schwelle von der Reizdauer sowie dem Sinnesystem sein. Rodenburg, Stassen und Maas (1981) nähern die Abhängigkeit von der Reizdauer durch eine Exponentialfunktion an. Sie ermitteln in einer Studie auf einem in vollständiger Dunkelheit rotierenden Stuhl bei einer Reizdauer von 3s eine Wahrnehmungsschwelle von $1,15^\circ/\text{s}^2$. Bei 25s Reizdauer erniedrigt sich diese auf $0,24^\circ/\text{s}^2$. Wird außerdem noch die visuelle Wahrnehmung hinzugenommen, so resultieren Werte von $0,48^\circ/\text{s}^2$ bzw. $0,17^\circ/\text{s}^2$.

Rotationsgeschwindigkeit Im Gegensatz zu Beschleunigungen können Translations- und Rotationsgeschwindigkeiten mit dem Vestibularapparat nicht wahrgenommen werden (Zenner, 2005). Der Mensch ist allerdings durchaus fähig, auch die Geschwindigkeit seiner Eigenbewegung wahrzunehmen. Dazu benötigt er allerdings visuelle Information. Exemplarisch sei eine Studie von Muragishi, Fukui und Ono (2007) genannt, welche den Einfluss visueller Information auf die Bewegungswahrnehmung des Menschen untersuchen. Den Probanden wird auf einer Videoleinwand eine virtuelle Straße gezeigt, welche sich entsprechend einer simulierten sinusförmigen Eigenbewegung des Fahrers hin und her bewegt. Muragishi et al. (2007) erklären anhand ihrer Experimente, dass die Sinusbewegung visuell anhand der Translations- bzw. Rotationsgeschwindigkeit wahrgenommen wird. Als Wahrnehmungsschwelle für Gierraten ermitteln sie in ihrem Versuch einen Wert von ca. $0,1^\circ/\text{s}$.

Die beschriebenen Studien verdeutlichen, dass Wahrnehmungsschwellen für die Bewegungswahrnehmung des Menschen unter teils sehr unterschiedlichen Versuchsbedingungen ermittelt werden. Während manche Arbeiten nur auf die rein vestibuläre Wahrnehmung fokussieren, indem die Versuche in vollständiger Dunkelheit sowie unter Ausblendung akustischer Reize stattfinden (z.B. Kingma, 2005), werden die Bewegungen in anderen Versuchen mit allen Sinnen wahrgenommen (z.B. Müller, 2015). Darüber hinaus unterscheiden sich die Versuche häufig in der Art und der Dauer der Bewegung. So existieren sowohl Studien, in welchen den Probanden konstante Beschleunigungen dargeboten werden (z.B. Müller, 2015; Rodenburg et al., 1981), als auch solche, die sinusförmig oszillierende Beschleunigungen einsetzen (z.B. Kingma, 2005; Muragishi et al., 2007).

Bei der Berücksichtigung von visueller Information zur Bewegungswahrnehmung sind die Zusammenhänge zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Position zu beachten. Eine mit dem Vestibularapparat wahrnehmbare Beschleunigung erhöht mit der Zeit die visuell wahrnehmbare Geschwindigkeit, welche wiederum über die Zeit zu einer Veränderung der Position führt. Auch diese kann visuell wahrgenommen werden. In der Literatur wird teilweise missverständlich von Wahrnehmungsschwellen für die Geschwindigkeit gesprochen, obwohl eigentlich die Beschleunigung zur Erreichung dieser Geschwindigkeit detektiert wurde. Wolf (2009) geht auf diese Thematik genauer ein. Die Bestimmung von rein visuellen Wahrnehmungsschwellen für Geschwindigkeit gestaltet sich ebenfalls schwierig, da nur schwer zu beurteilen ist, ob der Mensch tatsächlich die Geschwindigkeit selbst oder erst die mit der Zeit daraus resultierende Positionsänderung wahrnimmt. Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass die Ergebnisse aus der Literatur die Aussage von (Zenner, 2005, S.358) bestätigen, wonach das visuelle System einen entscheidenden Beitrag zur Bewegungswahrnehmung des Menschen liefert.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird sich, so weit möglich, auf die von Müller (2015) ermittelten Wahrnehmungsschwellen berufen, da diese unter Einbeziehung aller Sinnesysteme in einem sehr realitätsnahen Szenario ermittelt wurden. Leider können in der Literatur keine hinsichtlich Realitätsnähe vergleichbaren Ergebnissen für die Wahrnehmung von Querbeschleunigungen gefunden werden. Aufgrund der von Kingma (2005) im Linearsitzschlitten ermittelten, sehr ähnlichen Wahrnehmungsschwellen für Längs- und Querbeschleunigung und dem grundsätzlich vergleichbaren Wertebereich der Ergebnisse von Müller (2015) und Kingma (2005), wird sich im Rahmen dieser Arbeit daher auch für Querbeschleunigungen an den von Müller (2015) ermittelten Schwellen orientiert. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass für eine sichere (vgl. Tabelle 2.5) und schnelle (vgl. Rodenburg et al., 1981) Erkennung von Fahrzeugbewegungen durch den Fahrer tendenziell höhere Reizintensitäten zu wählen sind.

Für weiterführende Information zur Wahrnehmung von Fahrgeschwindigkeit in Längsrichtung sei z.B. auf Bubb (1977) verwiesen. Wahrnehmungsschwellen für die Relativgeschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugen werden beispielsweise in Todosiev (1963) untersucht.

2.5 Komfortable Fahrzeugbewegung

Der Begriff des Komforts ist ein nicht nur in der Fahrzeugentwicklung häufig verwendetes Konstrukt. Dabei sind die Abhandlungen darüber, was Komfort eigentlich bedeutet, ähnlich umfangreich wie die eigentliche Messung von Komfort. Bubb (2015b) stellt dementsprechend fest, dass es sich beim Komfort um einen diffusen Begriff handelt, der in etwa „Behaglichkeit“, „Bequemlichkeit“ und „Zufriedenheit“ ausdrückt. Bubb (2015b) unterscheidet zwischen den Begriffen Komfort und Diskomfort und beruft sich dabei auf eine Arbeit von Zhang, Helander und Drury (1996). Demnach wird Diskomfort mit biomechanischen Faktoren wie Druck oder Gelenkstellungen assoziiert, welche zu Unbehagen oder sogar Schmerz führen. Komfort wird dahingegen mit Gefallen, Entspannung und Wohlbefinden assoziiert. Des Öfteren wird darüber hinaus zwischen aktiv erfahrbarem Bedienkomfort und passiv wahrnehmbarem Fahrkomfort unterschieden (Didier, 2006; Ebeling & Neubert, 2001). In ähnlicher Weise unterscheiden Engeln und Vratil (2008) zwischen Handlungs- und Nutzungskomfort. Für die Umfänge dieser Arbeit spielt der Handlungs- bzw. Bedienkomfort eine untergeordnete Rolle. Der Schwerpunkt weiterer Betrachtungen liegt auf dem Nutzungs- bzw. Fahrkomfort. Die meisten Untersuchungen zum Fahrkomfort sind bis heute noch stark aus dem Bereich der klassischen Fahrzeug- bzw. Fahrwerkentwicklung motiviert. So beschreiben Heißing, Ersoy und Gies (2011, S. 465) den Fahrkomfort durch „ein geringes Beschleunigungsniveau der am Gesamtfahrzeug und an Fahrzeugkomponenten auftretenden Schwingungen“ sowie „niedrige Nick- und Wankbeschleunigungen“. Als weiteren Komfortaspekt nennen sie die Geräuscentwicklung im Fahrzeug.

2.5.1 Komfort im Kontext des automatisierten Fahrens

Im Kontext des automatisierten Fahrens existiert bis heute noch recht wenig Wissen darüber, was Fahrkomfort bedeutet. Ansätze finden sich beispielsweise im Forschungsprojekt INVENT. Dort wird als Metrik für den Fahrkomfort das mittlere Beschleunigungsquadrat beschrieben, aber auch der Ruck, also die Änderung der Beschleunigung, betrachtet (Volkswagen, 2006, S. 23). Auch Werling et al. (2010) berücksichtigen bei ihrem Trajektorienplanungsansatz den Ruck als einen zentralen Komfortfaktor.

Elbanhawi et al. (2015) geben einen umfangreichen Literaturüberblick zum Komfort beim automatisierten Fahren. Neben den Faktoren aus der klassischen Fahrzeugentwicklung identifizieren sie ebenfalls Ruck und Beschleunigung als Faktoren mit einem negativen Einfluss auf den wahrgenommenen Komfort. Als zusätzliche Aspekte nennen sie eine natürliche bzw. menschliche Trajektorienwahl, das Verhindern von Kinetose (Reisekrankheit) und die wahrgenommene Sicherheit. Im Zusammenhang mit dem Begriff der Natürlichkeit nennen sie Eigenschaften wie Gleichmäßigkeit und Kontinuität. Im Hinblick auf die wahrgenommene Sicherheit werden angemessene Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern und eine ruhige Ausführung von Fahrmanövern genannt. Bellem, Schönenberg, Krems und Schrauf (2016) leiten aus einer in manueller Fahrt durchgeführten Studie objektive Komfortmetriken für die Auslegung des Fahrverhaltens zukünftiger automatisierter Fahrzeuge ab. Dabei definieren sie Komfort als Zustand der durch die Abwesenheit von Unbehagen und Leid erreicht wird. Dies entspricht in etwa der Definition von Diskomfort nach Zhang et al. (1996) und Bubb (2015b). Bellem et al. (2016) finden ähnliche Komfortmetriken wie in den bereits genannten Quellen. Im Detail sind dies die Beschleunigung, der Ruck, der Abstand zu einem Vorderfahrzeug und die Standardabweichung zur Fahrstreifenmitte. Weitere Arbeiten (z.B. Schögl, Schrauf, Holzinger & Bogner, 2015; Siebert, Oehl, Höger & Pfister, 2013) nennen ähnliche Faktoren und erarbeiten Evaluierungsmethoden zur Messung von wahrgenommenem Komfort beim automatisierten Fahren mittels Befragung.

Eine im Zusammenhang mit der Definition von Fahrkomfort beim automatisierten Fahren immer wieder aufkommende Frage ist, ob die Automation den selben Fahrstil aufweisen sollte wie der individuelle Fahrer, der sie benutzt. Aktuelle Forschungsergebnisse geben hier keine eindeutige Antwort. So kommen Scherer, Schubert, Dettmann, Hartwich und Bullinger (2016) zu dem Ergebnis, „dass eine Ausrichtung des hochautomatisierten Fahrstils am individuellen Fahrverhalten jedes Fahrers keine oder nur sehr geringe Vorteile gegenüber vordefinierten Fahrten bietet“. Griesche, Nicolay, Assmann, Dotzauer und Käthner (2016) erklären dahingegen, es sei sehr sinnvoll, den Fahrstil der Automation an den des Fahrers anzupassen. Ein Punkt in dem sich die zitierten Publikationen wiederum einig sind ist, dass der vom Fahrer empfundene Komfort bzw. Diskomfort maßgeblich von den auftretenden Beschleunigungen sowie dem Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Forschung zu Fahrkomfort beim automatisierten Fahren noch am Anfang steht. Dies liegt sicherlich zum Teil daran, dass bisher die grundsätzliche technische Realisierung des automatisierten Fahrens im Vordergrund stand. Mit der aktuell steigenden Verfügbarkeit von automatisierten Fahrfunktionen in Prototypen oder sogar Serienfahrzeugen werden die Möglichkeiten zur Erforschung die-

ses Gebiets deutlich besser. Aus dem bisherigen Stand der Forschung lassen sich folgende Hauptfaktoren für ein komfortables Fahrverhalten ableiten:

- Geringes Beschleunigungs- und Ruckniveau
- Angemessene Abstände zu anderen Verkehrsteilnehmern und Hindernissen
- Gleichmäßige und ruhige Fahrzeugbewegungen

Gemäß der Definition von Zhang et al. (1996) und Bubb (2015b) betreffen die genannten Faktoren weniger die Steigerung des Komforts als vielmehr die Senkung bzw. Vermeidung von Diskomfort beim automatisierten Fahren. Die zitierte Literatur verwendet dennoch fast ausschließlich den Begriff des Komforts. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit soweit möglich von *akzeptierter Fahrzeugbewegung* gesprochen. Akzeptiert bedeutet dabei, dass der durch die Fahrzeugbewegung hervorgerufene Diskomfort sich auf einem vom Fahrer akzeptierten Niveau hält.

2.5.2 Menschliche Akzeptanzbereiche der Fahrzeugbewegung

Als Anhaltspunkt für die Gestaltung der automatisierten Fahrzeugbewegung wird im Folgenden ein Überblick über, größtenteils von menschlichen Fahrern gewählte, Dynamikbereiche der Fahrzeugbewegung gegeben. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen der Quer- und der Längsbewegung. Die Angaben beschränken sich auf den fahrdynamischen Normalbereich. Kritische Fahrsituationen wie Ausweich- und Notbremsmanöver werden nicht betrachtet. Aufgrund des in dieser Arbeit gesetzten Schwerpunktes der automatisierten Autobahnfahrt wird als das querdynamisch relevante Manöver der Fahrstreifenwechsel untersucht. Für die Längsdynamik sind hauptsächlich Beschleunigungs- und Annäherungsvorgänge relevant.

Querdynamik

Das querdynamische Verhalten beim Fahrstreifenwechsel wird in der Literatur größtenteils durch zwei Metriken beschrieben: Die für den Fahrstreifenwechsel benötigte Zeit und die während des Wechsels maximal auftretende Querbeschleunigung. Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über die in der Literatur zu findenden Werte. Die darin enthaltenen Bereiche ergeben sich daher, dass die Zeiten bzw. Beschleunigungen für verschiedene Bedingungen ermittelt wurden. So unterscheiden sowohl Sparmann (1978), als

auch Fastenmeier, Hinderer, Lehning und Gstalter (2001) nach der Richtung des Fahrstreifenwechsels, sowie der beim Wechsel vorliegenden Konstellation der umliegenden Verkehrsteilnehmer. Schimmelpfennig und Nackenhorst (1985) bestimmen die Querbeschleunigung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. In beiden Fällen wird eine Abhängigkeit von den genannten Faktoren ermittelt. Diese kann von Freyer (2008) jedoch weder für die Geschwindigkeit noch für die Verkehrssituation bestätigt werden.

Tabelle 2.6: Akzeptanzbereiche der Querdynamik beim Fahrstreifenwechsel

Quelle	Fahrstreifenwechselzeit	Querbeschleunigung	Abhängigkeit
Sparmann (1978)	2,57 - 2,69 s	-	Verkehrssituation
Schimmelpfennig und Nackenhorst (1985)	-	0,7 - 0,9 m/s^2	Geschwindigkeit
Sporrer et al. (1998)	3,1 - 6,5 s	1,3 m/s^2	Verkehrssituation
Fastenmeier et al. (2001)	1,7 - 4,9 s	-	Verkehrssituation
Freyer (2008)	1,8 s	0,75 m/s^2	-

Die Literaturwerte für die Fahrstreifenwechselzeit sind leider nur schwer vergleichbar, da hier unterschiedliche Definitionen existieren. Sparmann (1978) definiert sie als die Zeit, während der das Fahrzeug beide Fahrstreifen beansprucht. Der Fahrstreifenwechsel beginnt also in dem Moment, in dem das Fahrzeug die Markierung überfährt und endet, wenn es diese wieder verlässt. Fastenmeier et al. (2001) und Freyer (2008) berufen sich auf diese Definition. Bei Sporrer et al. (1998) beginnt der Wechsel dagegen bereits mit der Auslenkbewegung und endet erst, wenn sich das Fahrzeug wieder parallel im Zielfahrstreifen befindet.

Längsdynamik

Tabelle 2.7 stellt übliche Grenzen dar, innerhalb derer sich Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge in unkritischen Fahrsituationen aufhalten. Diese wurden für verschieden Anwendungsfälle ermittelt. Hoberock (1976) trifft auf Basis einer Literaturrecherche eine Aussage zu akzeptierten Beschleunigungen in öffentlichen Verkehrsmitteln. Die ISO-Norm 15622 (ISO, 2010) definiert Beschleunigungsgrenzen für ACC-Systeme zur automatisierten Fahrzeuglängsführung. Ehmans (2002) ermittelt für ein Simulationsmodell des menschlichen Fahrverhaltens die Verzögerung, die ein Fahrer maximal akzeptiert, um einen anderen Verkehrsteilnehmer einfädeln zu lassen. Bei Radke

(2013) werden vom Fahrer bei der Landstraßenfahrt gewählte, positive Beschleunigungen betrachtet. Festner, Baumann und Schramm (2016) untersucht den Einfluss der Längsdynamik einer automatisierten Fahrfunktion auf die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung des Menschen.

Tabelle 2.7: Akzeptanzbereiche der Längsdynamik

Quelle	Maximale Verzögerung	Maximale Beschleunigung	Erklärung
Hoferock (1976)	1,1 - 1,5 m/s^2	1,1 - 1,5 m/s^2	Akzeptierte Beschleunigungen in öffentlichen Verkehrsmitteln
ISO-Norm 15622 (ISO, 2010)	3,5 m/s^2	2 m/s^2	Grenzen für den Betrieb eines ACC-Systems
Ehmanns (2002)	1,5 m/s^2	-	Akzeptierte Verzögerung, um jemandem das Einfädeln zu ermöglichen
Radke (2013)	-	1,0 - 2,3 m/s^2	Beschleunigung bei Landstraßenfahrt
Festner et al. (2016)	1,7 - 1,9 m/s^2	-	Applikationsbereich für eine Studie zur Komfortwahrnehmung beim automatisierten Fahren

2.6 Forschungsbedarf

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, besteht die Rolle des Fahrers eines teil- oder hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugs zu einem großen Teil darin, das Automations-system zu überwachen und als Rückfallebene im Falle einer Systemgrenze der Automation zur Verfügung zu stehen. Für beide Aufgaben ist ein hohes Bewusstsein des Fahrers über die aktuelle Fahrsituation sowie insbesondere über den Zustand und die Absicht des Automationssystems unabdingbar. In Abschnitt 2.3 sind daher aktuelle Forschungsansätze beschrieben, die das Ziel verfolgen, den Fahrer trotz Automatisierung in die Fahrzeugführung einzubinden. Dabei wird die angemessene Rückmeldung von Information über das Automationssystem an den Fahrer als Grundvoraussetzung für ein gutes Situationsbewusstsein gesehen. Die Wissenschaft ist sich einig, dass Rückmeldung möglichst multimodal also über mehrere Sinneskanäle gleichzeitig an den Fahrer übermittelt werden sollte (Bubb, 2015b). Da sich die geschilderten Ansätze größtenteils auf visuelle und auditorische Rückmeldungen konzentrieren, besteht, wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ein grundsätzlicher Forschungsbedarf in der Untersuchung der Bewegungswahrnehmung, also des vestibulären Sinnessystems für die Rückmeldung von Zuständen der Automation an den Fahrer.

In diesem Zusammenhang stellt sich die grundsätzliche Frage, ob der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs spürbare Fahrzeugbewegungen als nützliche Information oder als unnütze Störung empfindet. Prinzipiell steht vestibuläre Rückmeldung durch auf den Fahrer wirkende Beschleunigungen im Widerspruch zum Bedürfnis nach möglichst geringem Diskomfort (vgl. Abschnitt 2.5.1). Während der Diskomfort beim Warnruck eines Sicherheitssystems (vgl. Färber & Maurer, 2005) von geringer Bedeutung ist, spielt dieser bei einem kontinuierlich wirkenden Komfortsystem (vgl. Gasser et al., 2015) eine entscheidende Rolle. Demgegenüber steht die vielversprechende Möglichkeit die vestibuläre Wahrnehmung als intuitiven Informations- und Rückmeldekanal zum Fahrer nutzen zu können. Setzt man die in Abschnitt 2.4.3 in Form von Wahrnehmungsschwellen quantifizierte vestibuläre Wahrnehmungsleistung des Fahrers in Bezug zu den üblicherweise in manueller Fahrt auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen (Abschnitt 2.5.2), so scheint eine spürbare und gleichzeitig vom Fahrer akzeptierte Fahrzeugbewegung umsetzbar. Es existieren jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nur sehr wenige Forschungsergebnisse zur Frage, welche Dynamiken der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs hinsichtlich der Fahrzeugbewegung akzeptiert. So könnten Beschleunigungen, die bei manueller Fahrt als akzeptabel eingeschätzt werden in einem automatisiert fahrenden Fahrzeug bereits als störend empfunden werden. Bisherige Literaturwerte beschränken sich auf die in Abschnitt 2.5.1 genannten qualitativen Aussagen, sowie wenige quantitative Aussagen im Zusammenhang mit der Entwicklung

des Assistenzsystems ACC (Didier, 2006; Freyer, 2008; ISO, 2010). Die methodische Bestimmung von Akzeptanzschwellen für die Fahrzeugbewegung beim automatisierten Fahren stellt daher einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Neben der grundsätzlichen Akzeptanz vestibulärer Rückmeldung ist ein Konzept zu entwickeln, wie das automatisierte Fahrverhalten zu gestalten ist, um dem Fahrer wahrnehmbar und informativ Rückmeldung zu geben. In bisherigen Ansätzen zur Generierung automatisierten Fahrverhaltens wird dieser Aspekt nahezu nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2). Daher sind sowohl Gestaltungsempfehlungen für die bewegungsbeeinflussenden Ebenen der Fahrzeugführung zu erarbeiten sowie eine Evaluierung dieser Gestaltungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit durchzuführen.

Für die im Folgenden beschriebenen Konzepte und Untersuchungen werden folgende Forschungsfragen formuliert:

1. Wünscht bzw. akzeptiert der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs vestibuläre Rückmeldung zum Zustand des Automationssystems?
2. Welche Dynamiken der Fahrzeugbewegung akzeptiert der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs und wie können diese Akzeptanzschwellen ermittelt werden?
3. Nach welchen Gestaltungsempfehlungen sollte die automatisierte Fahrzeugbewegung ausgelegt werden, um für den Fahrer möglichst informativ zu sein?
4. Kann die Vorhersehbarkeit der Handlungen des Automationssystems durch diese Gestaltungsmaßnahmen verbessert werden?

In den folgenden Kapiteln werden Antworten auf diese Forschungsfragen erarbeitet und ein Gestaltungskonzept für das Fahrstreifenwechselmanöver in einem System zur automatisierten Autobahnfahrt umgesetzt. Außerdem erfolgt eine Evaluierung der Wirksamkeit der vestibulären Rückmeldung in einer Realfahrstudie auf der Autobahn.

3 Bewegungsrückmeldung beim automatisierten Fahren

Das folgende Kapitel beschreibt die Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für das Bewegungsverhalten eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs, mit dem Ziel, das Systembewusstsein des Fahrers zu unterstützen. Kerngedanke ist dabei die vestibuläre Rückmeldung von Zuständen und Absichten des Automationssystems an den Fahrer. Zunächst wird dafür die Frage beantwortet, auf welcher Abstraktionsebene der Fahrzeugführung das Bewusstsein des Fahrers gefördert werden sollte. Dabei wird sich an den vier in Abschnitt 2.2 definierten Ebenen orientiert. Anschließend erfolgt eine Sammlung von Anforderungen an die vestibuläre Rückmeldung von Systeminformationen. Es folgt die Beschreibung der angewandten Methodik zur Gestaltung des Bewegungsverhaltens sowie die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für die Auslegung des automatisierten Fahrverhaltens. Die folgenden Gedanken werden in Teilen auch von Lange, Albert, Siedersberger und Bengler (2015) beschrieben.

3.1 Zielsetzung und adressierte Abstraktionsebene

Im Falle eines automatisiert fahrenden Fahrzeug handelt es sich bei der zugrundeliegenden Automation um ein sehr komplexes System, welches auf mehreren Hierarchiestufen unterschiedlicher Abstraktion arbeitet und dabei verschiedenste Verhaltensweisen kombiniert. Vom Nutzer des Systems ist nicht zu erwarten, dass er sämtliche Subsysteme und Wirkzusammenhänge dieses Systems vollständig versteht und während der Fahrt laufend überwachen kann. Sowohl das mentale Modell des Fahrers als auch eine Benutzerschnittstelle des Systems müssen das reale System daher bis zu einem gewissen Grad abstrahieren (vgl. Degani & Heymann, 2002). Eine entscheidende Frage für dieses Kapitel ist, welche Abstraktionsebene der Fahrzeugführung mit einer Bewegungsrückmeldung adressiert werden sollte bzw. welche Aspekte des Gesamtsystems man für den Nutzer sichtbar machen will. Einen Anhaltspunkt liefert eine Studie von Beggiato et al. (2015). Sie gehen in Experteninterviews sowie einer Probandenstudie der Frage nach, welche Informationen der Fahrer sowohl während der manuellen Fahrt als

Fahrer, als auch der automatisierten Fahrt als Überwacher und Rückfallebene benötigt bzw. wünscht. Bei der automatisierten Fahrt wird unterschieden, ob der Fahrer noch überwachen muss oder nicht. Beggiato et al. (2015) kommen zu dem Schluss, dass für die manuelle Fahrt überwiegend operative Information über das Umfeld, wie der Abstand oder die Geschwindigkeit anderer Fahrzeuge, relevant sind. Bei der automatisierten Fahrt verändert sich der Informationsbedarf. Hier sind Informationen über den Systemzustand sowie taktische bzw. strategische Informationen bezüglich des gerade ausgeführten bzw. zukünftig geplanten Fahrmanövers von primärer Bedeutung. Außerdem ist der Informationsbedarf für den Fall, dass der Fahrer die Automation überwachen muss, am höchsten. Diese Aussagen decken sich mit den Forschungsergebnissen von Othersen (2016), die ebenfalls die Ankündigung von Fahrmanövern als eine der von überwachenden Fahrern am wichtigsten erachtete Systeminformation identifiziert. Auch im Forschungsprojekt Conduct-by-Wire (Winner & Hakuli, 2006) findet eine Interaktion zwischen Automationssystem und Fahrer auf der Manöverebene statt. Der Fokus des Informationsbedarf des Fahrers für die Überwachung des Systems wird dementsprechend in dieser Arbeit auf der Manöverebene verortet.

Die passende vestibuläre Rückmeldung von Informationen der Manöverebene ist eine herausfordernde Aufgabe, da die Bewegungswahrnehmung des Fahrers der visuellen Wahrnehmung hinsichtlich der Komplexität der zu übertragenden Information unterlegen ist. Während über ein grafisches Display ohne weiteres abstrakte Information wie z.B. ein bevorstehendes Manöver (Abbildung 3.1a) oder eine Fahrtroute (Abbildung 3.1b) angezeigt werden kann, beschränkt sich die Bewegungswahrnehmung auf sehr viel einfachere Empfindungen wie Beschleunigungen und Geschwindigkeiten. Hinter dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept steht die Grundannahme, dass die Nutzer erster automatisierter Fahrfunktionen geübte Autofahrer sind und noch regelmäßig selbst ein Fahrzeug führen. Das bedeutet, dass diese Fahrer bereits ein sehr gefestigtes mentales Modell für die Aufgabe „Fahrzeugführung“ besitzen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Fahrer übliche Verhaltensweisen beim Autofahren kennt. Er ist dadurch in der Lage, Bewegungsmuster, die er während der Fahrt wahrnimmt, in Kombination mit Wissen über die aktuelle Fahrsituation abstrakten Fahrhandlungen und Manövern zuzuordnen. Dementsprechend wird angenommen, dass auch Wahrnehmungen mit, für sich betrachtet, niedrigem Informationsgehalt, wie beispielsweise eine Beschleunigung, im entsprechenden situativen Kontext für den Fahrer einen durchaus hohen Informationsgehalt haben.

Mit der Bewegungsrückmeldung werden in dieser Arbeit zwei Ziele verfolgt. Einerseits sollen die durch eine Fahrzeugbewegung erzeugten vestibulären Reize dazu dienen, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf ein bevorstehendes Fahrmanöver zu lenken. Andererseits sollen sie einem bereits aufmerksam beobachtenden Fahrer frühzeitig Informatio-

nen über Entscheidungen des Automationssystems liefern, um zu beurteilen, ob das Automationssystem das Richtige tut.



(a) Central Status Indicator Display
(Auto Bild, 2015)



(b) Kontaktanaloges HUD (Damböck et al., 2012)

Abbildung 3.1: Beispiele für die visuelle Darbietung von Informationen des Automationssystems an den Fahrer

3.2 Anforderungen an die Rückmeldung

Im Folgenden werden unabhängig von der zu übertragenden Information Anforderungen an die Rückmeldung von Informationen des Automationssystems an den Nutzer gesammelt. Eine erste naheliegende Anforderung an eine Rückmeldung ist, dass diese vom Nutzer des Systems wahrgenommen werden kann. So fordert die Europäische Kommission (1998) in einem „Statement of Principles“, dass eine Rückmeldung von einem Informations- und Kommunikationssystem im Fahrzeug deutlich wahrnehmbar und rechtzeitig erfolgen sollte. Bubb (2015c, S. 269) nennt ebenfalls die Anforderung, dass eine Rückmeldung überschwellig gestaltet werden muss. Des Weiteren fordert er, dass eine Rückmeldung auf eine Systemeingabe zeitlich unmittelbar nach der Eingabe erfolgen muss. Unmittelbar definiert er als mit weniger als 200 ms Verzug. Ist eine derart schnelle Rückmeldung technisch nicht realisierbar, sollte dies angezeigt werden. Bei über 2 s Verzugszeit fordert Bubb darüber hinaus eine Fortschrittsanzeige. Er bezieht sich bei diesen Werten auf Veröffentlichungen von Vaas (2000), Pöppel (2000) und Wolf (2009), die besagen, dass eine Zeitspanne von bis zu 3 s vom Menschen als die Gegenwart bzw. das „Jetzt“ wahrgenommen wird.

Nach Bubb (2015c, S. 269) muss eine Rückmeldung Antworten auf die Fragen „Was habe ich getan?“ und „In welchem Zustand befindet sich das System?“ geben. Unter „System“ wird an dieser Stelle sowohl das Automationssystem als auch das Fahrzeugumfeld, in dem die Automation agiert, verstanden. Bei der Rückmeldung von Infor-

mationen der Automation an den Fahrer werden folglich drei Arten der Rückmeldung unterschieden:

- Rückmeldungen auf Bedienhandlungen des Fahrers
- Rückmeldungen über den Zustand der Automation bzw. von der Automation getroffene Entscheidungen
- Rückmeldungen über das Fahrzeugumfeld

Für Rückmeldungen auf Fahrereingaben sollten die genannten 0,2 - 2 s Zeitverzug eingehalten werden. Bei einer Rückmeldung über Zustand bzw. Entscheidungen der Automation oder Umfeldinformationen ist eher der Begriff der „Rechtzeitigkeit“ anzuwenden. D.h. je nach Situation sollte die Rückmeldung so früh erfolgen, dass der Fahrer noch in der Lage ist, eine Systementscheidung zu überprüfen und wenn nötig zu unterbinden. Einen groben Richtwert liefert hierzu eine Untersuchung von Wakasugi (2005), der experimentell die minimal notwendige Vorwarnzeit eines Fahrstreifenwechselwarnsystems ermittelt. Er fordert auf Basis seiner Ergebnisse, dass der Fahrer mindestens 2 s vor einer potentiellen Kollision gewarnt werden muss. Als weiterer Anhaltspunkt dient eine Studie zu Übernahmezeiten von Gold, Damböck, Bengler und Lorenz (2013). Darin werden Probanden zunächst aus der hochautomatisierten Fahrt aufgefordert, das System zu überwachen, anschließend erfolgt eine Übernahmeaufforderung aus der teilautomatisierten Fahrt heraus. Die Probanden greifen im Mittel 2,1 s nach der Übernahmeaufforderung in die Fahrzeugführung ein. Die beiden Zeitwerte geben einen ersten Anhaltspunkt dafür, dass der Fahrer für eine rechtzeitige Reaktion auf ein unerwartetes Ereignis bzw. die rechtzeitige Übernahme der Fahrzeugführung aus der Beobachterrolle heraus ca. 2 - 3 s zuvor die für die Übernahme notwendige Information erhalten sollte.

Aus den speziellen Rahmenbedingungen einer Rückmeldung über die Fahrzeugbewegung ergeben sich weitere Anforderungen. Zum einen führt eine überschwellige Bewegungsrückmeldung zwangsläufig zu auf den Fahrer wirkenden Beschleunigungen, welche im Allgemeinen mit Diskomfort verbunden werden (vgl. Abschnitt 2.5). Es muss daher darauf geachtet werden, dass Rückmeldungen über die Fahrzeugbewegung sich in einem Dynamikbereich aufhalten, der vom Fahrer akzeptiert wird. Darüber hinaus sollte eine akzeptierte Fahrzeugbewegung dem vom Fahrer in der entsprechenden Situation erwarteten Fahrverhalten bzw. seinem mentalen Modell entsprechen. In diesem Zusammenhang ist auch sicherzustellen, dass er die wahrgenommenen Fahrzeugbewegungen auf der im vorherigen Abschnitt adressierten Abstraktionsebene richtig interpretieren kann und er deren Bedeutung (z.B. ein begonnenes oder bevorstehendes Fahrmanöver) versteht. Tabelle 3.1 fasst die gesammelten Anforderungen an das zu entwickelnde Gestaltungskonzept zusammen.

Tabelle 3.1: Anforderungen an die vestibuläre Rückmeldung von Informationen der Automation an den Fahrer

A1:	Die Rückmeldung muss überschwellig gestaltet sein
A2:	Die Rückmeldung muss vom Fahrer akzeptiert werden (Diskomfort und Erwartung)
A3:	Die Rückmeldung muss für den Fahrer verständlich und eindeutig sein
A4:	Eine Rückmeldung auf Fahrereingaben soll spätestens nach 0,2 s oder mit zwischenzeitlicher Warteanzeige nach 2 s erfolgen
A5:	Eine Rückmeldung von Systementscheidungen und Fahrzeugumfeld soll rechtzeitig erfolgen, so dass der Fahrer die Situation noch überprüfen und gegebenenfalls eingreifen kann. Es werden ca. 2 - 3 s Zeitreserve angestrebt

3.3 Methodik

Die Gestaltungsempfehlungen zur vestibulären Rückmeldung von Systemzuständen werden in mehreren Schritten erarbeitet. Im ersten Schritt erfolgt die Analyse und Strukturierung der Fahrzeugbewegung. Betrachtet man die Fahrzeugbewegung als Anzeigeelement, werden in diesem Schritt die damit darstellbaren Informationen definiert. Die kontinuierliche Fahrzeugbewegung wird dafür in einfache diskrete Bewegungselemente unterteilt. In Schritt zwei werden für die Autobahnfahrt relevante Manöver identifiziert und den Manövern charakteristische Bewegungselemente zugeordnet. In Schritt drei werden Gestaltungsempfehlungen für ein Bewegungsverhalten erarbeitet, welches dem Fahrer rechtzeitige vestibuläre Rückmeldung zum gerade ausgeführten oder bevorstehenden Manöver übermittelt.

3.3.1 Fahrzeugbewegung als vestibuläres Anzeigeelement

Ein Fahrzeug ist ein dynamisches System, welches sich innerhalb seiner fahrdynamischen Grenzen frei auf einer Oberfläche bewegen kann. Dadurch lässt sich prinzipiell ein sehr großes Spektrum an für den Fahrer vestibulär wahrnehmbaren Reizen erzeugen. Als vestibulärer Reiz wird in dieser Arbeit eine auf den Fahrer wirkende Beschleunigung in Fahrzeuginnen- oder -querrichtung bezeichnet. Neben der aktuell vorliegenden Beschleunigung nimmt der Fahrer auch den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung wahr. Dadurch ergibt sich neben dem Betrag und der Richtung der Beschleunigung der Beschleunigungsgradient bzw. der Ruck (vgl. Müller, 2015) als zusätzliche Wahrnehmung. Über die Fahrzeugbewegung lassen sich folglich die vier in Abbildung 3.2 skizzierten

Reize darstellen, wobei diese jeweils noch durch die Intensität bzw. den Betrag der Beschleunigung und den Ruck modifiziert werden können. Darüber hinaus sei angemerkt, dass Längs- und Querbeschleunigungen natürlich auch simultan auftreten können.

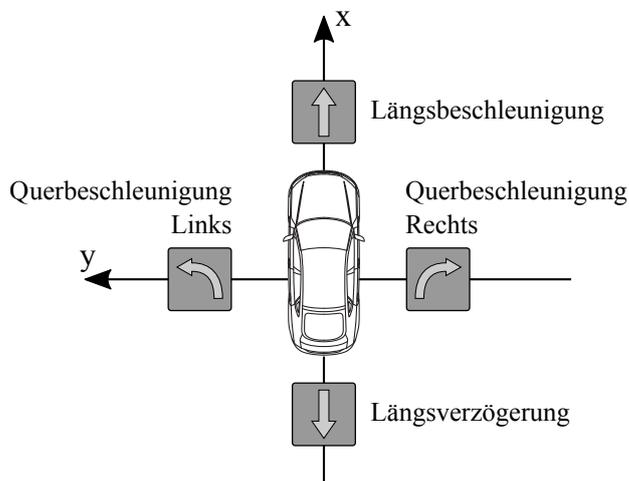


Abbildung 3.2: Elementare Fahrzeugbewegungen

Beschleunigungen in Längsrichtung werden direkt durch ein Antriebs- oder Bremsmoment erzeugt. In Querrichtung ist die Beschleunigung des Fahrzeugs nicht direkt beeinflussbar. Ein Lenkeinschlag an der Vorderachse führt erst in Kombination mit einer betragsmäßig positiven Fahrgeschwindigkeit dazu, dass sich das Fahrzeug auf einer Kreisbahn bewegt. Dabei wirkt die Querbeschleunigung in Form der Zentripetalkraft auf Fahrzeug und Fahrer. Bei sehr niedrigen Fahrgeschwindigkeiten ist die Erzeugung einer vom Fahrer deutlich wahrnehmbaren Querbeschleunigung daher nur bedingt möglich. Diese Einschränkung wird im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch vernachlässigt.

Im Allgemeinen treten Beschleunigungen im Fahrzeug nicht dauerhaft in eine Richtung auf, sondern immer nur für einen begrenzten Zeitraum. Längsbeschleunigungen dienen dabei der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, Längsverzögerungen der Geschwindigkeitsverringerung. Querbeschleunigungen sind im Allgemeinen mit einer Fahrtrichtungsänderung verbunden.

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird der Begriff des Bewegungselements eingeführt. Dieses zeichnet sich durch eine für einen gewissen Zeitraum betragsmäßig positive Beschleunigung in eine der vier Richtungen aus. Es wird, wie in Abbildung 3.3 skizziert, durch einen Maximalwert der Beschleunigung a_{max} sowie einen maximalen Ruck j_{max} näher beschrieben.

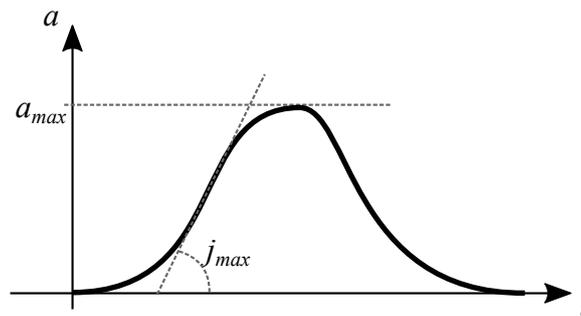


Abbildung 3.3: Beschreibung des Beschleunigungsverlaufs (a) eines Bewegungselements

3.3.2 Zuordnung von Bewegungselementen zu Manövertransitionen

Bei der Nutzung des Fahrzeugs im Straßenverkehr wird die prinzipiell mögliche Bewegungsfreiheit des Fahrzeugs durch Infrastruktur, andere Verkehrsteilnehmer sowie Verkehrsregeln stark eingeschränkt. In Deutschland legt die Straßenverkehrsordnung (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013) z.B. fest, dass Fahrzeuge Fahrbahnen (§2(1)) bzw. Fahrstreifen (§7) benutzen müssen und einen bestimmten Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen einzuhalten haben (§4). Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen aus Verkehrsumfeld und Gesetzgebung hat sich eine Unterteilung der Fahrzeugbewegung in einzelne Fahrmanöver etabliert. In der Literatur findet sich eine Vielzahl sogenannter Manöverkataloge, die eine Sammlung an, für die Bewältigung der Fahraufgabe notwendigen, Fahrmanövern darstellen. Tabelle 3.2 listet einige dieser Quellen zu Manöverkatalogen aus der Literatur auf und nennt deren Zielsetzung.

Wie Tabelle 3.2 zeigt, werden Manöverkataloge zu verschiedenen Zwecken eingesetzt. Einerseits dienen sie als modulare Bausteine für die Realisierung automatisiert fahrender Fahrzeuge, andererseits werden sie auch in manueller bzw. assistierter Fahrt zur Klassifikation einer Fahrsituation eingesetzt, um den Fahrer je nach Beanspruchung optimal unterstützen zu können. Darüber hinaus werden Manöver als eine Art Sprache für die Interaktion zwischen Fahrer und Automation genutzt (vgl. Winner & Hakuli, 2006; Albert et al., 2014). In dieser Arbeit sollen Manöver ebenfalls im Sinne einer Kommunikation der Automation an den Fahrer eingesetzt werden. Dambier (2010, S. 32) beschreibt ein Fahrmanöver als ein „Verhaltensmuster“ des Fahrzeugs im Straßenverkehr, welches durch den Fahrzeugführer in Abhängigkeit seiner Ziele bestimmt wird. Neben sekundären Handlungen wie Blinken und Hupen wird das manöverspezifische Verhalten zu einem großen Teil durch die Bewegung des Fahrzeugs im Verkehr bestimmt. Die für ein Manöver charakteristischen Bewegungsmuster kann der Fahrer

Tabelle 3.2: Übersicht zu Manöverkatalogen in der Literatur

Quelle	Zielsetzung
Nagel, Enkelmann und Struck (1995)	Modellierung der von einem automatisiert fahrenden Fahrzeug zu beherrschenden Fahrmanöver (Anzahl: 17)
Tölle (1996)	Wie bei Nagel et al. (1995), jedoch Reduktion auf 9 Manöver
Vollrath, Schießl, Altmüller, Dambier und Kornblum (2005)	Erkennung von Fahrmanövern zur Schätzung der Fahrerbeanspruchung (Anzahl: 14)
Dambier (2010)	Wie bei Vollrath et al. (2005), jedoch 12 Manöver mit je bis zu drei Ausprägungen
Franz et al. (2012)	Realisierung einer manöverbasierten Fahrzeugführung (vgl. Winner und Hakuli (2006), Anzahl: 7)

wahrnehmen und mit seinen mentalen Modellen der Fahraufgabe abgleichen. Erkennt er ein passendes Bewegungsmuster, so ist es ihm möglich, eine Prädiktion über den zukünftigen Verlauf der Fahrsituation bzw. des Fahrmanövers anzustellen (vgl. Endsley, 1995). Im Folgenden wird auf Basis der Manöverkataloge aus Tabelle 3.2 ein reduzierter Katalog für einfache Autobahnszenarien abgeleitet. Anschließend wird ein Vorschlag präsentiert, wie den darin enthaltenen Manövern bzw. insbesondere den Transitionen zwischen den Fahrmanövern charakteristische Bewegungselemente zugeordnet werden können, die dem Fahrer helfen, ein Manöver zu identifizieren.

Für die in dieser Arbeit fokussierte Autobahnfahrt können in allen Katalogen aus Tabelle 3.2 Varianten der zwei Fahrmanöver *Fahrstreifenfolgen* und *Fahrstreifenwechseln* gefunden werden. Dabei wird meist zwischen dem *Fahrstreifenfolgen* ohne Vorderfahrzeug und der Folgefahrt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug unterschieden. Während z.B. bei Nagel et al. (1995) die beiden Manöver *einem Straßenzug folgen* und *einem Fahrzeug folgen* existieren, definiert Dambier (2010) lediglich das Manöver *Follow*, welches die beiden Ausprägungen *Follow a road* und *Follow a preceding vehicle* besitzt. Ein Manöver, welches nicht in allen Katalogen explizit aufgeführt ist, ist die *Annäherung* an ein Vorderfahrzeug. Diese kann als Übergangsmanöver vom *Fahrstreifenfolgen* ohne Vorderfahrzeug zur Folgefahrt gesehen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Annäherungsmanöver als Teil der Folgefahrt betrachtet. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die in Tabelle 3.3 beschriebenen Fahrmanöver.

Zwischen den Manövern sind diverse Übergänge möglich. So sind sowohl Transitionen zwischen den beiden Fahrstreifenfolgemanövern, als auch von jedem Fahrstreifenfolgemanöver in eines der beiden Fahrstreifenwechselmanöver und zurück möglich. Die Tran-

Tabelle 3.3: Betrachtete Fahrmanöver für die Autobahnfahrt

Manöver	Beschreibung
Fahrstreifenfolgen - Freifahrt	Querführung des Fahrzeugs innerhalb eines Fahrstreifens. Einhalten einer definierten Sollgeschwindigkeit in Längsrichtung.
Fahrstreifenfolgen - Folgefahrt	Querführung des Fahrzeugs innerhalb eines Fahrstreifens. Einhalten eines Sollabstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug in Längsrichtung.
Fahrstreifenwechsel - Links	Querführung des Fahrzeug vom aktuellen in den linken Nachbarfahrstreifen. Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug im aktuellen Fahrstreifen sowie eine optional vorhandene Lücke auf dem Zielfahrstreifen.
Fahrstreifenwechsel - Rechts	Querführung des Fahrzeug vom aktuellen in den rechten Nachbarfahrstreifen. Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug im aktuellen Fahrstreifen sowie eine optional vorhandene Lücke auf dem Zielfahrstreifen.

sition von der *Freifahrt* in die *Folgefahrt* erfolgt mit dem Vorhandensein eines relevanten Vorderfahrzeugs. Ein Fahrzeug ist relevant, wenn es mit einer niedrigeren Fahrgeschwindigkeit als der eigenen im aktuellen Fahrstreifen fährt oder in diesen einschert. Anpassungen der Sollgeschwindigkeit (z.B. durch ein Geschwindigkeitsbegrenzungsschild) können als eine Transition vom Manöver *Freifahrt* zurück zu sich selbst dargestellt werden. In analoger Weise geschieht dies, wenn im Manöver *Folgefahrt* ein Fahrzeug zwischen dem aktuellen Vorderfahrzeug und dem eigenen Fahrzeug einschert.

Abbildung 3.4 stellt die die genannten Manöver und Transitionen grafisch dar. Darüber hinaus zeigt sie einen Versuch, die für eine Manövertransition charakteristische Fahrzeugbewegung durch die im vorherigen Abschnitt genannten Bewegungselemente zu beschreiben. In Abwesenheit eines, die mögliche Fahrgeschwindigkeit beeinflussenden, Vorderfahrzeugs führen in der *Freifahrt* Anpassungen der Sollgeschwindigkeit zu Längsbeschleunigungen und -verzögerungen. Der Übergang von der *Freifahrt* in die *Folgefahrt* macht eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit notwendig, die durch eine Längsverzögerung spürbar wird. Schert während der *Folgefahrt* ein Fahrzeug in die Lücke vor dem eigenen Fahrzeug ein, so führt dies ebenfalls zu einer Längsverzögerung. Das Manöver *Fahrstreifenwechsel* zeichnet sich in beiden Ausprägungen durch eine charakteristische Links-Rechts- bzw. Rechts-Links-Abfolge der Querbeschleunigung aus. Die Erste führt zu einer Ausrichtung des Fahrzeugs in Richtung des Zielfahrstreifen, die Zweite richtet das Fahrzeug wieder für die *Folgefahrt* parallel zum neuen Fahrstreifen aus.

Manöverabhängige Fahrzeugbewegungen

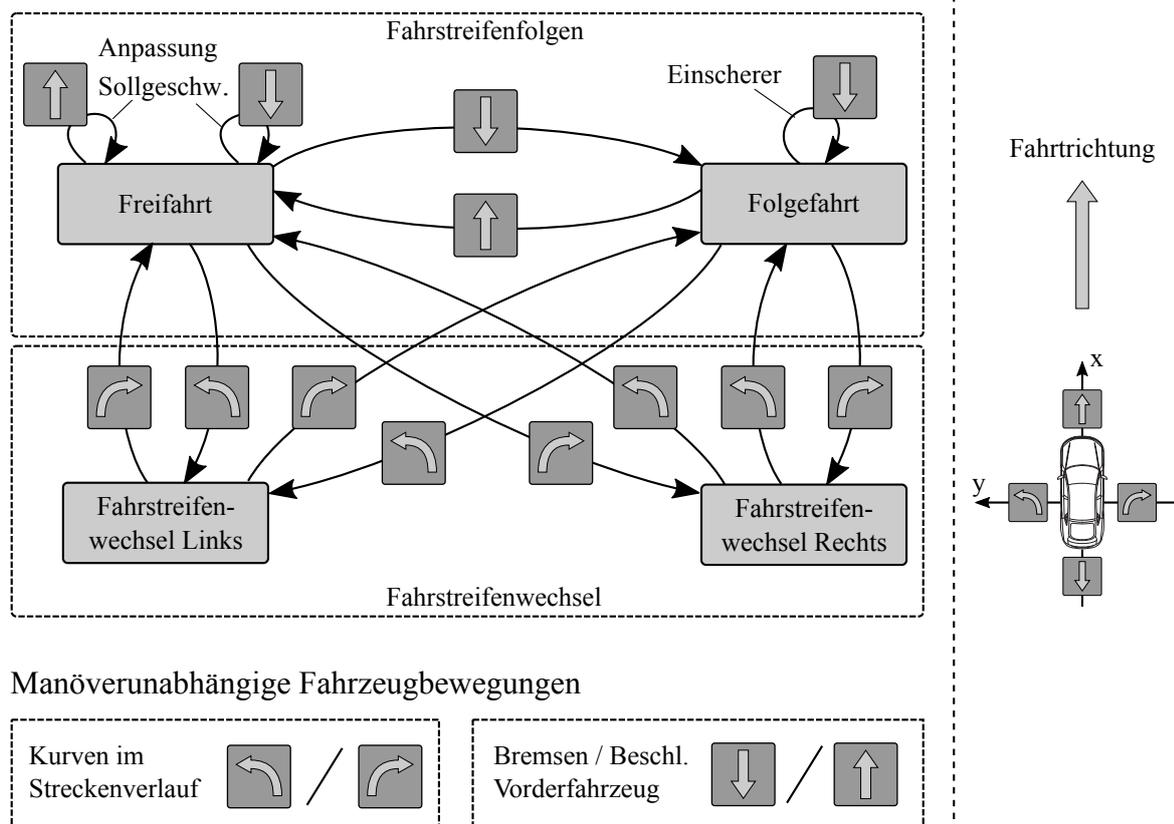


Abbildung 3.4: Zuordnung von Bewegungselementen zu Fahrmanövertransitionen

Neben den geschilderten Bewegungen, die charakteristisch für eine bestimmte Manövertransition sind, können weitere manöverunabhängige Bewegungen wahrgenommen werden, die beispielsweise durch den Verlauf der Strecke oder das dynamische Verhalten eines vorausfahrenden Fahrzeugs bedingt sind. Diese sind im unteren Teil der Abbildung 3.4 dargestellt. Darüber hinaus existieren weitere Bewegungselemente, die je nach spezifischer Ausprägung eines Manövers auftreten. Ein Beispiel dafür ist die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an eine Lücke auf dem Nachbarfahrstreifen zur Ermöglichung eines Fahrstreifenwechsels. Diese führt zu einer Längsbeschleunigung oder -verzögerung. Da diese aber nicht zwingend für das Manöver *Fahrstreifenwechsel* notwendig ist, ist sie in Abbildung 3.4 nicht enthalten. Die Abbildung stellt damit nur eine Teilmenge der möglichen Bewegungswahrnehmungen dar. Darüber hinaus sind auch Ausnahmefälle möglich: Ein während dem Manöver *Freifahrt* mit ausreichendem Abstand und gleicher Geschwindigkeit vor dem eigenen Fahrzeug einscherendes Vorderfahrzeug würde einen Übergang in das Manöver *Folgefahrt* bedeuten, es wäre dafür aber keinerlei Verzögerung notwendig. Das in Abbildung 3.4 dargestellte Modell soll als Grundlage für die nachfolgenden Überlegungen dienen, erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass Autofahrer ein ähnlich geartetes mentales Modell

besitzen, aufgrund dessen sie gewisse Erwartungen an die wahrzunehmenden Bewegungen bei bestimmten Fahrmanövern haben. So wird der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs beispielsweise erwarten, dass er eine Verzögerung wahrnimmt, wenn sich das eigene Fahrzeug einem langsameren Vorderfahrzeug nähert. In den nächsten Abschnitten werden Empfehlungen dafür erarbeiten, wie die vom Fahrer wahrgenommene Bewegung gestaltet werden sollte, damit sie einen möglichst informativen Charakter besitzt.

3.3.3 Erarbeitung von Gestaltungsempfehlungen

Wie bereits erörtert, können vestibuläre Reize nicht wie bei einem grafischen Anzeigeelement nach Belieben generiert werden. Sie stehen in direktem Zusammenhang zur Bewegung des Fahrzeugs, welche wiederum durch Verkehrsumfeld und -regeln eingeschränkt ist. Wenn jedoch ein erfahrener Autofahrer, die für ein Manöver charakteristischen Bewegungselemente bzw. -abfolgen in Form eines mentalen Modells kennt (vgl. vorheriger Abschnitt 3.3.2), kann er diese einem Fahrmanöver zuordnen und es gegebenenfalls antizipieren. Um den Fahrer bei der Zuordnung von wahrgenommenen Bewegungen zu Manövertransitionen zu unterstützen, werden im Folgenden Gestaltungsempfehlungen für das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs erarbeitet. Dabei wird sich an den zuvor definierten Anforderungen an eine vestibuläre Rückmeldung aus Tabelle 3.1 orientiert.

Überschwellige und akzeptierte Rückmeldung (A1, A2)

Gemäß Anforderung A1 und A2 ist das für ein Manöver charakteristische Bewegungsverhalten so zu beeinflussen, dass die resultierenden Beschleunigungen überschwellig gestaltet sind und gleichzeitig vom Nutzer noch akzeptiert werden. Die untere Grenze stellt daher die Wahrnehmungsschwelle a_{wahrn} dar (vgl. Kapitel 2.4.3), die obere Grenze wird als Akzeptanzschwelle a_{akzept} bezeichnet, bis zu der sich der Fahrer noch wohl fühlt. Abbildung 3.5 stellt den beschriebenen Zielbereich dar, innerhalb dessen sich die Beschleunigung für die Rückmeldung aufhalten sollte. Für die Wahl der unteren Grenze muss darüber hinaus Hintergrundrauschen, welches z.B. durch Bodenunebenheiten oder sonstige Störungen entsteht, berücksichtigt werden. So muss die Grenze möglicherweise für die Erreichung eines ausreichenden Signal-Rausch-Abstands angehoben werden.

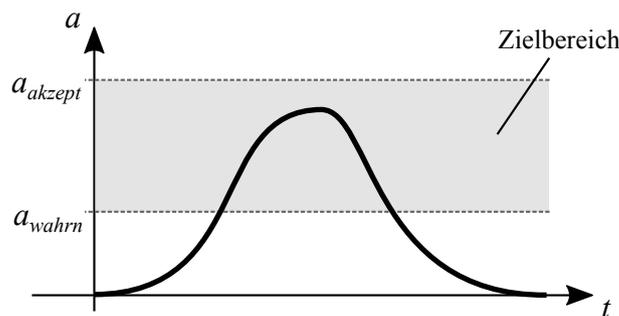


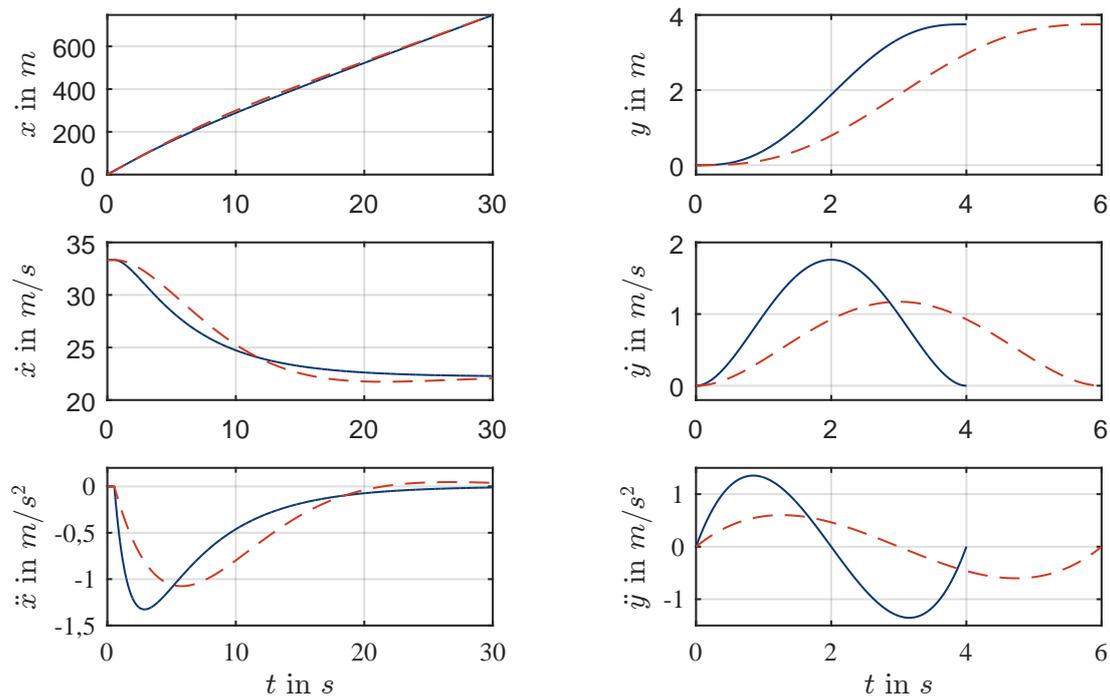
Abbildung 3.5: Auslegungsziel für die Gestaltung überschwelliger Beschleunigungen (a)

Verständliche und eindeutige Rückmeldung (A3)

Bezugnehmend auf Anforderung A3 ist das Ziel zu verfolgen, die Bewegungsrückmeldungen möglichst eindeutig und unterscheidbar zu gestalten. Ein Beispiel für eine potentiell uneindeutige Rückmeldung ist eine Längsverzögerung im Manöver *Freifahrt*. Diese kann sowohl auf eine Geschwindigkeitsanpassung, als auch auf den Übergang in die *Folgefahrt* hindeuten. Ähnlich verhält es sich bei der Querschleunigung. Diese kann sowohl einen *Fahrstreifenwechsel*, als auch eine Kurve im Streckenverlauf bedeuten. Eine Möglichkeit hinsichtlich ihrer Richtung gleiche Bewegungselemente unterscheidbar zu machen, ist es, die Form des Beschleunigungsverlaufs je nach Zustandsübergang unterschiedlich zu gestalten. In der vereinfachten Beschreibung aus Abbildung 3.3 bedeutet dies, den Absolutwert oder den Ruck des Bewegungselements je nach Zustandsübergang verschieden zu wählen. Abbildung 3.6 stellt diese Möglichkeit exemplarisch für eine Geschwindigkeitsreduktion (a) sowie ein Fahrstreifenwechselmanöver (b) dar. Sowohl für die Geschwindigkeitsreduktion, als auch den Fahrstreifenwechsel unterscheiden sich die beiden dargestellten Ausprägungen hinsichtlich maximalem Ruck und maximaler Beschleunigung. Für eine bessere Unterscheidbarkeit von Längsverzögerungen ist es denkbar für Geschwindigkeitsanpassungen immer ein langgezogenes Beschleunigungsprofil mit niedrigem Ruck und geringer Beschleunigung zu wählen, während die Annäherung an langsamere Vorderfahrzeuge stets mit höherem Ruck und größerer Beschleunigung durchgeführt wird. In ähnlicher Weise sollte ein Fahrstreifenwechsel in Querrichtung immer höhere Rucke und Beschleunigungen aufweisen, als sie üblicherweise beim Folgen des Straßenverlaufes auftreten.

Rechtzeitige Rückmeldung (A4, A5)

Im Folgenden wird auf die zeitlichen Aspekte der Rückmeldung eingegangen. Rückmeldungen auf Benutzereingaben (A4), wie z.B. die Beauftragung eines Fahrstreifenwechs-



(a) Zwei Ausprägungen einer Geschwindigkeitsreduktion von 120 auf 80 km/h

(b) Zwei Ausprägungen eines Fahrstreifenwechsels mit 3,75 m Querversatz

Abbildung 3.6: Beispiele für die Differenzierung von Bewegungselementen

sels werden dabei nicht betrachtet. Stattdessen konzentriert sich dieser Abschnitt auf die rechtzeitige Rückmeldung von durch das Automationssystem initiierten Manövertransitionen (A5). Rechtzeitig bedeutet dabei gemäß A5, dass die mit der Manövertransition einhergehende Beschleunigung zu einem Zeitpunkt wahrnehmbar ist, zu dem der Fahrer noch die Möglichkeit hat, im Falle einer Fehlentscheidung des Systems einzugreifen. Als Zielzeitreserve werden dafür 2-3 s angestrebt (vgl. Tabelle 3.1).

Ähnlich zu Hypothesentests in der Statistik kann bei Manöverentscheidungen der Automation zwischen Alpha- und Beta-Fehlern unterschieden werden. Bei einem Alpha-Fehler findet eine Manövertransition statt, welche fehlerhaft bzw. gefährlich ist. Ein Beta-Fehler zeichnet sich dahingegen dadurch aus, dass die Verkehrssituation ein Manöver notwendig macht, das Automationssystem dieses Manöver jedoch fälschlicherweise nicht ausführt. Ein Beispiel für einen Alpha-Fehler ist eine Transition in das Manöver *Fahrstreifenwechsel-Links*, obwohl sich auf dem linken Nachbarfahrstreifen ein anderes Fahrzeug befindet. Als Beispiel für einen Beta-Fehler sei ein einscherendes Fahrzeug genannt, welches vom Automationssystem gar nicht oder fehlerhaft erkannt wird, so dass keine Transition in die *Folgefahrt* mit anschließender Verzögerung stattfindet.

Die Erkennung von Beta-Fehlern durch den Fahrer kann nur indirekt unterstützt werden, da das Automationssystem selbst nicht weiß, dass eine Transition notwendig ist. Indirekt bedeutet hier, dass Manövertransitionen immer früh und deutlich spürbar, also mit einer über den in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Wahrnehmungsschwellen liegenden Fahrzeugbewegung, erfolgen sollten. Ist eine, aufgrund der Fahrsituation notwendige, Manövertransition nicht spürbar, kann der Fahrer rechtzeitig davon ausgehen, dass ein Beta-Fehler vorliegt und eingreifen. Im Falle eines unaufmerksamen Fahrers hilft diese Maßnahme allerdings nicht.

Alpha-Fehler bieten im Gegensatz zu Beta-Fehlern den Vorteil, dass auch ein unaufmerksamer Fahrer aufgrund der fehlerhaften Manövertransition eine Rückmeldung erhält. D.h. neben dem Informationsgehalt der Rückmeldung kann sie zudem der Aufmerksamkeitslenkung dienen. In diesem Fall wird die zuvor genannte Zeitreserve relevant. Die Zeitreserve berechnet sich als die Differenz zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die mit der Manövertransition verbundene Bewegung wahrgenommen wird, und dem Zeitpunkt, ab dem eine fehlerhafte Transition zu einer potentiell gefährlichen Fahrsituation führt. Als potentiell gefährliche Situationen werden dazu die folgenden beiden Fälle betrachtet: 1) Übergang in die Freifahrt, obwohl noch ein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden ist. 2) Durchführung eines Fahrstreifenwechsel, obwohl der Zielfahrstreifen belegt ist.

Übergang in die Freifahrt Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch den Verlauf des Abstands zu einem Vorderfahrzeug für den Fall, dass aus der stationären *Folgefahrt* eine Transition in die *Freifahrt* stattfindet und mit der maximalen ACC-Beschleunigung von 2 m/s^2 (vgl. Tabelle 2.7) sowie einem Ruck von 1 m/s^3 beschleunigt wird. Es wird mit einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h und einer Zeitlücke von $1,8\text{ s}$ bzw. einem Abstand zum Vordermann von 50 m (halber Tacho) gerechnet. Die Situation wird als kritisch betrachtet, wenn eine Zeitlücke von $0,8\text{ s}$ bzw. ein Abstand von 22 m unterschritten wird. Als Wahrnehmungsschwelle wird die 80% Schwelle von $0,18\text{ m/s}^2$ nach Müller (2015) gewählt.

Der Fahrer kann damit nach ca. $0,2\text{ s}$ die Beschleunigung wahrnehmen. Nach ca. $6,3\text{ s}$ wird der Mindestabstand unterschritten. Es verbleibt dem Fahrer damit eine Zeitreserve von $6,1\text{ s}$, um den Fehler zu erkennen und in die Fahrzeugführung einzugreifen. Da es sich bei den gewählten 2 m/s^2 bereits um eine vergleichsweise starke Beschleunigung handelt, können die geforderten $2\text{ - }3\text{ s}$ für diese Szenario leicht erreicht werden. Voraussetzung ist, dass der in der *Folgefahrt* gewählte Sicherheitsabstand ausreichend groß gewählt wird.

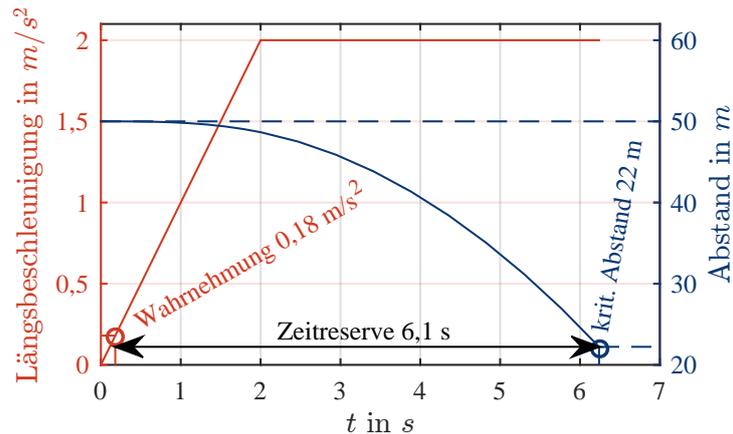


Abbildung 3.7: Zeitreserve des Fahrers bei einer fehlerhaften Beschleunigung in der Folgefahrt ($j_{x,max} = 1 \text{ m/s}^3$, $a_{x,max} = 2,0 \text{ m/s}^2$)

Übergang in den Fahrstreifenwechsel Für das Fahrstreifenwechselmanöver ist die geforderte Zeitreserve deutlich schwerer zu erreichen, da der Abstand zu potentiellen Kollisionsobjekten im Nebenfahrstreifen deutlich geringer ist. Die Distanz zum Nebenfahrstreifen beträgt bei mittiger Fahrt eine halbe Fahrstreifenbreite, abzüglich einer halben Fahrzeugbreite. Um dem Fahrer den Beginn des Wechsels gemäß A1 deutlich wahrnehmbar zurückzumelden, wird ebenfalls die 80 % Wahrnehmungsschwelle nach Müller (2015) gewählt. Für die Querbewegung wird exemplarisch eine, für Fahrstreifenwechselmanöver typische Querbewegung von $0,8 \text{ m/s}^2$ (vgl. Tabelle 2.6) sowie ein Ruck von $1,0 \text{ m/s}^3$ angenommen. Abbildung 3.8 stellt diesen Querbewegungsverlauf sowie den daraus resultierenden Verlauf der Querposition des Fahrzeugs im Fahrstreifen dar. Bei einer angenommenen Fahrstreifenbreite von $3,75 \text{ m}$ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008) und einer Fahrzeugbreite von 2 m verlässt das Fahrzeug ab einer Querposition von $0,875 \text{ m}$ den eigenen Fahrstreifen. Zwischen dem Moment, bei dem die Querbewegung die Wahrnehmungsschwelle des Fahrers überschreitet und dem Moment, bei dem das Fahrzeug die Begrenzung zum Nachbarfahrstreifen überfährt liegen im geschilderten Beispiel $1,7 \text{ s}$.

Eine Möglichkeit, die Zeitreserve zu erhöhen ist es, den Ruck zu steigern und die Absolutbeschleunigung zu senken. Bei einer Querbewegung auf Höhe der gewählten Wahrnehmungsschwelle von $0,18 \text{ m/s}^2$ und einem Ruck von $5,0 \text{ m/s}^3$ kann damit eine Zeitreserve von $3,1 \text{ s}$ erreicht werden. Dabei steht jedoch einerseits der hohe Ruck im Widerspruch zu den in Abschnitt 2.5 beschriebenen Komfortmetriken und es besteht andererseits nach wie vor eine Wahrscheinlichkeit von 20 %, dass die Beschleunigung nicht wahrgenommen wird.

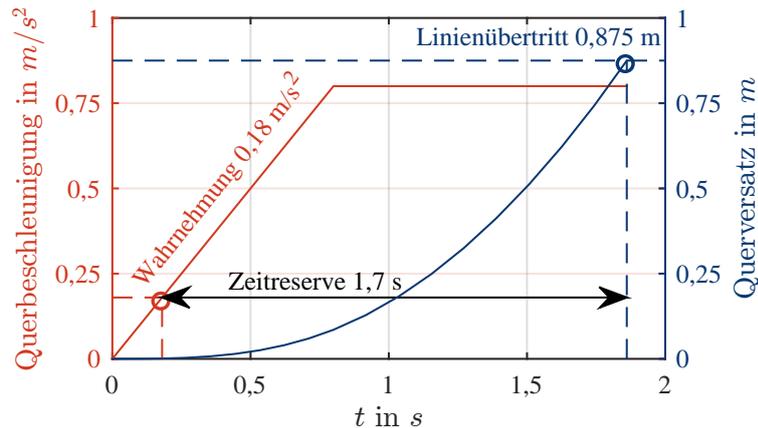


Abbildung 3.8: Zeitreserve des Fahrers bei einer fehlerhaften Fahrstreifenwechsellösung ($j_{y,max} = 1 \text{ m/s}^3$, $a_{y,max} = 0,8 \text{ m/s}^2$)

Das zweite Beispiel zeigt, dass die angestrebten Zeitreserven alleine durch die gezielte Auslegung der charakteristischen Bewegungsmuster eines Manövers in manchen Fällen nicht erreicht werden können. Um dem Fahrer in diesen Fällen dennoch frühzeitig Rückmeldung zu geben, müssen zusätzliche Bewegungselemente eingebracht werden. Die Herausforderung ist dabei, diese Bewegungen so zu gestalten, dass sie vom Fahrer korrekt interpretiert werden, da sie unter Umständen noch nicht in seinem mentalen Modell verankert sind. Ein konkretes Auslegungskonzept wird später in Kapitel 6 am Beispiel des automatisierten Fahrstreifenwechsels erarbeitet.

Weitere Gestaltungsempfehlungen

Neben den genannten, speziell auf die Rückmeldung von Manövertransitionen fokussierten Gestaltungsempfehlungen, können weitere Empfehlungen abgeleitet werden. Eine für den überwachenden Fahrer äußerst wichtige Information ist, ob das Automationssystem überhaupt aktiv ist. Um dem Fahrer Feedback zu diesem globalen Systemzustand zu geben, sollte er, unabhängig vom gerade ausgeführten Manöver, die aktive Regelung der Automation stets wahrnehmen können. Es ist also fraglich, ob die Regelung des Fahrzeugs so sanft ausgelegt werden sollte, dass der Fahrer nicht mehr unterscheiden kann, ob die Automation aktiv ist oder ob das Fahrzeug führerlos dahinrollt. Aus diesem Grund sollte ein Kompromiss zwischen ruhiger und immer noch wahrnehmbarer Regelung auf Stabilisierungsebene gefunden werden.

Die Ausführungen zu den zeitlichen Aspekten einer Bewegungsrückmeldung haben gezeigt, dass sich je nach Fahrsituation und Manöver unterschiedliche Zeitreserven für eine Übernahme ergeben bzw. die Beherrschbarkeit bestimmter Fahrmanöver im Falle

einer Fehlentscheidung unterschiedlich ist. Vor diesem Hintergrund sind Fahrmanöver, die sich nicht mit ausreichender Zeitreserve an den Fahrer zurückmelden lassen oder eine schnelle Reaktion des Fahrers im Fehlerfall erfordern, grundsätzlich zu vermeiden. So sollte beispielsweise in einer Einschersituation, die entweder einen abrupten Fahrstreifenwechsel oder ein schnelles Bremsmanöver notwendig macht, wenn möglich immer das Bremsmanöver bevorzugt werden. Ein Fahrstreifenwechsel ist in kurzer Zeit von einem beobachtenden oder gar unaufmerksamen Fahrer nur schwer absicherbar.

Auch wenn die bisher genannten Empfehlungen lediglich das Fahrverhalten selbst betreffen, ist eine Abstimmung des Fahrverhaltens der Automation mit dem konventionellen Anzeigeelementen, wie z.B. Kombiinstrument oder HUD dringend zu empfehlen. So sollte dem Fahrer neben der vestibulären Rückmeldung eines Manöverübergangs dieser ebenfalls über ein visuelles Anzeigeelement dargestellt werden. Hier kann darüber hinaus noch detailliertere Information, wie beispielsweise der Grund für das Fahrmanöver, angezeigt werden.

4 Entwurf des Automationssystems

Das folgende Kapitel beschreibt Teilkomponenten des entwickelten Systems zur automatisierten Fahrzeugführung. Wie bereits in Abschnitt 2.2 des Grundlagenteils genannt, werden Aspekte der Umfeldwahrnehmung größtenteils ausgeblendet. Der Schwerpunkt liegt auf den Komponenten der Verhaltensgenerierung, welche die vom Fahrer wahrnehmbare Fahrzeugbewegung beeinflussen. Das beschriebene System stellt die Grundlage für die in Kapitel 5 und 6 durchgeführten Untersuchungen dar.

4.1 Betrachtetes Zielsystem

Die in Abschnitt 2.3 herausgearbeiteten Möglichkeiten der Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und Automation verdeutlichen, dass der Begriff „automatisiertes Fahren“ alles andere als binär ist. Zwischen einem vollständig manuell geführten und einem vollständig selbst fahrenden Fahrzeug, in dem der Mensch nur noch Transportgut ist, liegt eine riesige Menge an möglichen Zwischenstufen. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle eine Konkretisierung des im weiteren Verlauf der Arbeit betrachteten Zielsystems. Es wird ein System für die automatisierte Autobahnfahrt betrachtet, welches die Längs- und Querführung des Fahrzeugs auf Trajektorien- und Stabilisierungsebene selbstständig ausführt. Dabei besteht kein dauerhafter Kontakt des Fahrers zu den primären Bedienelementen des Fahrzeugs. Auf Manöverebene kann das System die Manöver *Freifahrt*, *Folgefahrt* sowie *Fahrstreifenwechsel Links* und *Rechts* (vgl. Tabelle 3.3) ausführen. Die Aufgabe der Navigationsebene beschränkt sich auf die Überprüfung, ob sich das Fahrzeug auf einer Autobahn befindet und ob die Autobahn demnächst zu verlassen ist. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und jederzeit übernahmefähig sein. Es handelt sich nach der BASt-Nomenklatur um ein teilautomatisiertes System (Gasser, 2012) bzw. ein Level-2 Automationssystem nach dem SAE-Schema (SAE, 2016).

4.2 Systemmodell

Das im Folgenden beschriebene Systemmodell orientiert sich an der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Struktur. Neben dem, die Fahraufgabe selbst repräsentierenden Subsystem der Verhaltensgenerierung mit seinen vier Ebenen, existiert ein Wahrnehmungssystem, die Bedien- und Anzeigeelemente sowie die Fahrzeugaktork. In Abbildung 4.1 ist die Gesamtarchitektur des Systems skizziert. Es ist zu erwähnen, dass die Aufgabe der Trajektorienebene in die Längs- und Querführungsanteile aufgeteilt ist. Die Trajektorie des Fahrzeugs setzt sich dadurch aus einer Bahn ohne Zeitbezug sowie einer Sollbeschleunigung zusammen. In den folgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Komponenten der Verhaltensgenerierung genauer eingegangen.

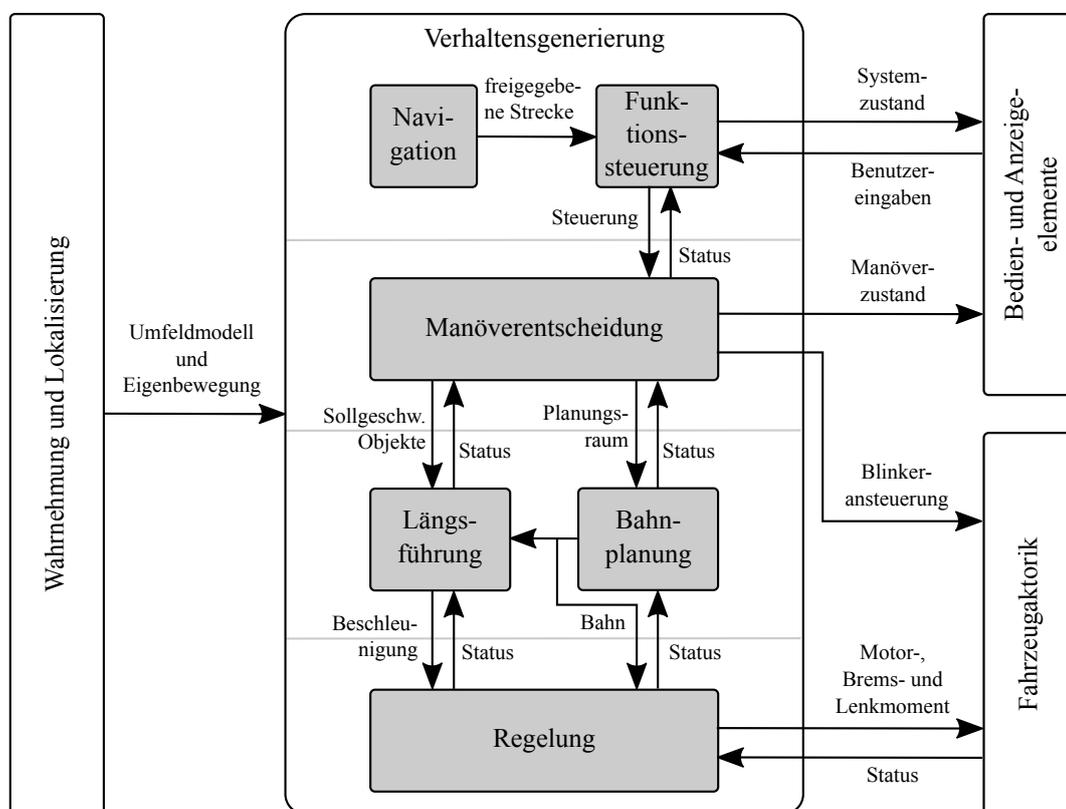


Abbildung 4.1: Funktionale Systemarchitektur

4.2.1 Navigation

Die Navigation wird, wie bereits erwähnt, im Rahmen dieser Arbeit stark vereinfacht betrachtet. Sie prüft, ob sich das Fahrzeug auf einer freigegebenen Strecke befindet

und kennt das Missionselement *Strecke folgen*. Sie meldet eine Systemgrenze an die Funktionssteuerung, falls das Ende der freigegebenen Strecke erreicht wird.

4.2.2 Funktionssteuerung

Die Funktionssteuerung koordiniert die Aktivierung und Deaktivierung der Automation. Sie verarbeitet neben der Streckenfreigabe der Navigation den Status der unterlagerten Ebenen sowie Benutzereingaben. Sie schickt den aktuellen Systemzustand an die Bedien- und Anzeigeelemente und steuert die unterlagerte Ebene der Manöverentscheidung. In Abbildung 4.2 ist sie in reduzierter Form als Zustandsautomat modelliert. Die Zustände der Funktionssteuerung sind *Aktiv*, *Inaktiv* sowie *Übernahmeaufforderung*. Die Transitionen zwischen den Zuständen können entweder über die Bedienhandlungen vom Fahrer freigegeben werden oder vom System selbst, indem eine Systemgrenze überschritten wird.

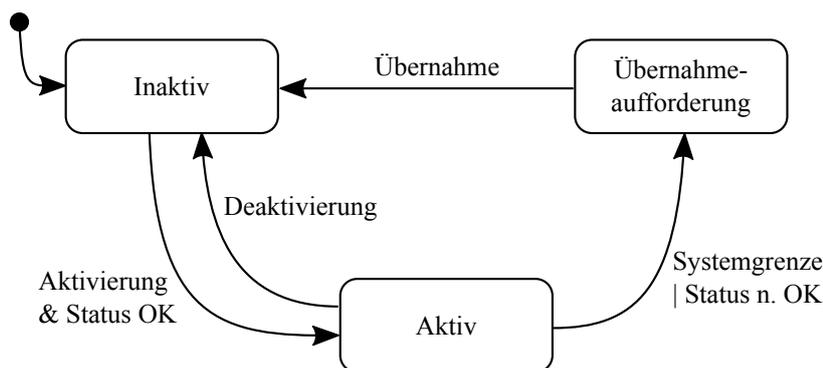


Abbildung 4.2: Systemmodell Funktionssteuerung

4.2.3 Manöverebene

Abbildung 4.3 gibt eine Übersicht über den Aufbau der Manöverebene. Das Kernelement ist ein Zustandsautomat. Für die Transitionen im Automaten dienen Daten der Funktionssteuerung sowie abstrakte Größen, die ein Situationsanalysemodul auf Basis der im Umfeldmodell repräsentierten Verkehrssituation berechnet. Beispiele für solche Größen sind die Motivation sowie die Durchführbarkeit eines Fahrstreifenwechsels, aber auch die Information, ob ein Vorderfahrzeug vorhanden ist oder nicht. Auf die Algorithmen innerhalb des Situationsanalysemoduls wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Ansätze zur Berechnung der Fahrstreifenwechsellmotivation können beispielsweise bei Ulbrich und Maurer (2015) gefunden werden. In Abhängigkeit des in-

ternen Zustands des Automaten generiert ein nachgelagertes Modul Vorgaben für die Trajektorienplanungsebene in Form eines Planungsraums für die Querführung und der Sollgeschwindigkeit sowie relevanten Objekte für die Längsführung.

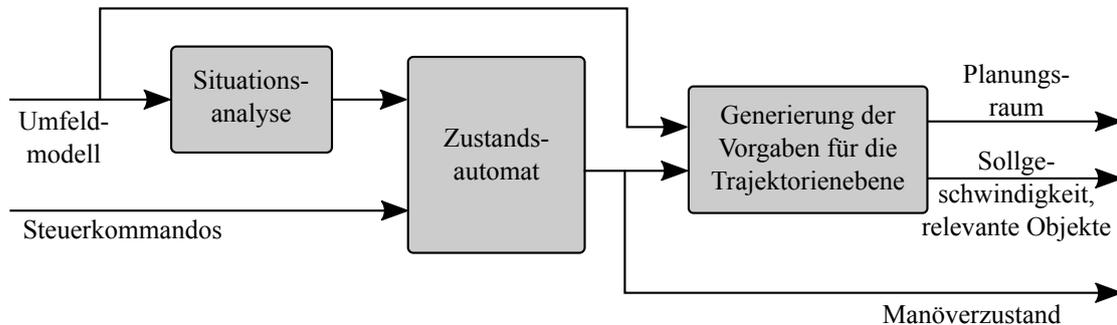


Abbildung 4.3: Systemmodell der Manöverebene

Manöverzustände

Innerhalb des Automaten werden, wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, die beiden Manöver *Fahrstreifenfolgen* und *Fahrstreifenwechsel* unterschieden. Darüber hinaus existiert ein Manöver *Manuelle Fahrt*, welches den passiven Zustand darstellt, der aktiv ist, wenn der Fahrer die Fahrzeugführung ausführt. Der zugehörige Zustandsautomat ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Die in Abbildung 3.4 genannten Zustände *Freifahrt* und *Folgefahrt* wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit im übergeordneten Zustand *Fahrstreifenfolgen* zusammengefasst.

Im Situationsanalysemodul werden für das Fahrstreifenfolgemanöver folgende Aufgaben durchgeführt: Extraktion des eigenen Fahrstreifens aus dem Umfeldmodell und Bestimmung der relevanten Objekte für die Längsführung.

Das Fahrstreifenwechselmanöver wird ebenfalls in Subzustände untergliedert. Diese orientieren sich an den in den Arbeiten von Ehmanns (2001) und Fastenmeier et al. (2001) beschriebenen Manöverphasen. Die *Vorbereitungsphase* dient dazu, das Fahrstreifenwechselmanöver vorzubereiten bzw. möglich zu machen. Dies kann z.B. durch die Anpassung der Längsführung hin zu einer Lücke auf dem Zielfahrstreifen (vgl. Ardelt et al., 2012) oder das frühzeitige Setzen des Blinkers erfolgen. Bestätigt das Situationsanalysemodul die Durchführbarkeit des Wechsels, so erfolgt die Transition in den Zustand *Durchführung*. Hier beginnt das Fahrzeug mit der Querbewegung in Richtung des Zielfahrstreifens. Nach Erreichen des Zielfahrstreifens wechselt das Manöver in die Phase *Abschluss*. Zusätzlich kann der Fahrstreifenwechsel unter bestimmten Kriterien abgebrochen werden. Im Situationsanalysemodul werden für das Fahrstreifenwechselmanöver

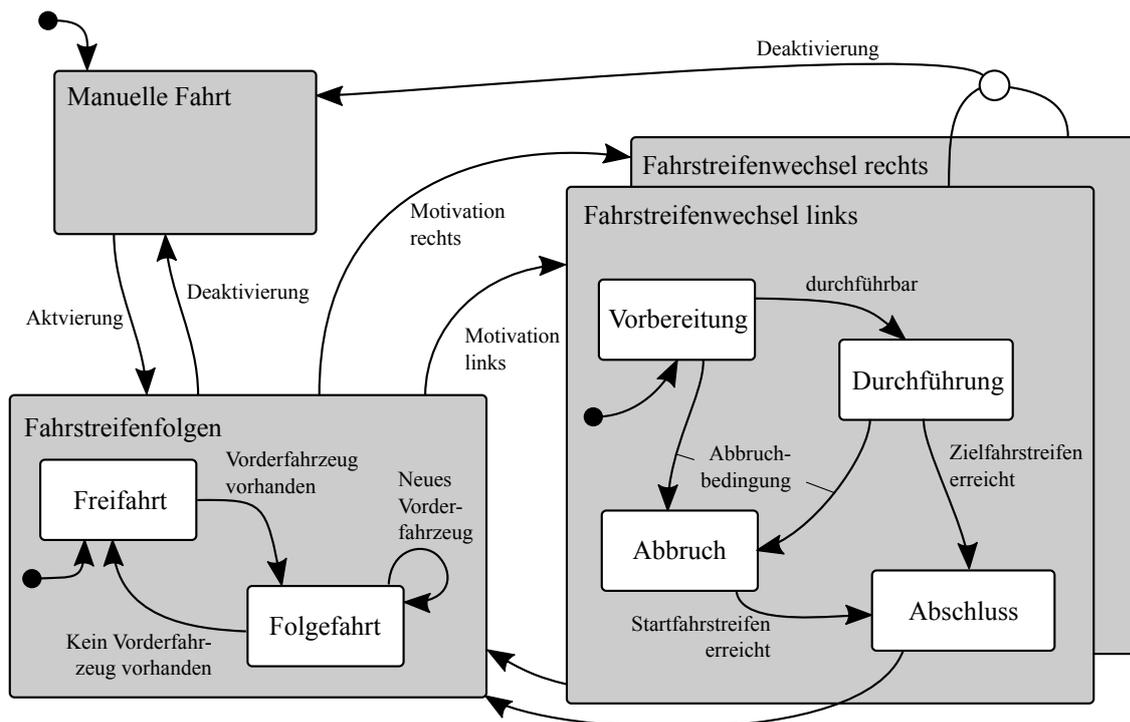


Abbildung 4.4: Zustandsautomat der Manöroveňene

folgende Aufgaben durchgeführt: Extraktion des Start- und Zielfahrestreifens aus dem Umfeldmodell, Bestimmung der relevanten Objekte für das Manöver, Berechnung der Fahrestreifenwechelmotivation, Prüfung der Fahrestreifenwecheldurchführbarkeit sowie Evaluierung der Abbruchkriterien.

Vorgaben für Bahnplanung und Längsführung

Als Schnittstelle zur Trajektorienplanungsebene werden von der Manöroveňene der Planungsraum für die Bahnplanung sowie eine Sollgeschwindigkeit und längsführungsrelevante Objekte vorgegeben. Dies ist in Abbildung 4.5 exemplarisch dargestellt. Das Planungsziel wird in lateraler Richtung in Form einer Referenzbahn beschrieben. Diese gibt einen groben Sollpfad vor, der in den meisten Fällen der Fahrestreifenmitte entspricht. In longitudinaler Richtung ist das Ziel durch eine Sollgeschwindigkeit definiert. Der Planungsraum schränkt die Bewegungsmöglichkeiten des Fahrzeugs ein, indem er eine linke und rechte Grenze definiert.

Der Planungsraum sowie die Objekte werden von dem in Abbildung 4.3 dargestellten Funktionsmodul in Abhängigkeit des Manöverzustands befüllt. Abbildung 4.6 stellt dies für die definierten Manöverzustände exemplarisch dar. Das eigene Fahrzeug ist mit *Ego* gekennzeichnet.

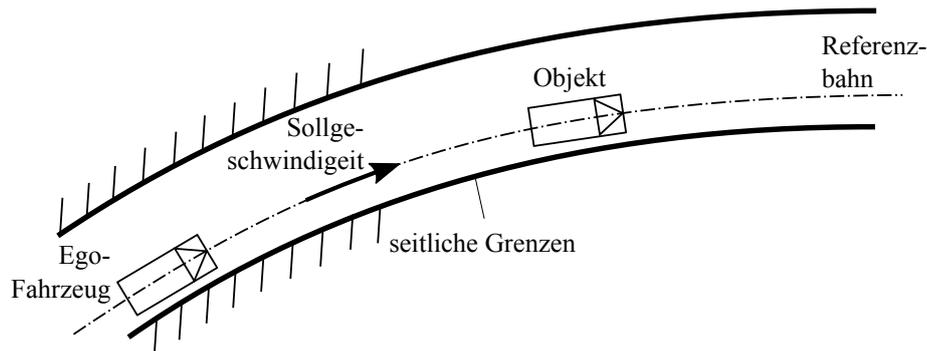


Abbildung 4.5: Schnittstelle zur Trajektorienplanungsebene

4.2.4 Trajektorienplanungsebene

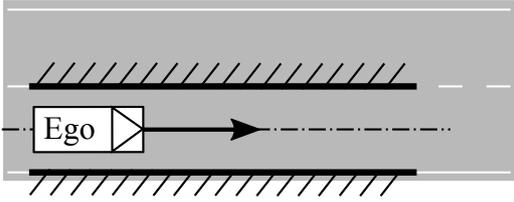
Aufgabe der Trajektorienplanungsebene ist es, für das, durch die Vorgaben der Manöverebene beschriebene Planungsproblem eine Lösung zu finden. Wie bereits im Abschnitt 2.2.2 des Grundlagenteils beschrieben, lassen sich in der Literatur eine Vielzahl an Algorithmen für diese Aufgabe finden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vergleichsweise einfacher Ansatz verfolgt, bei dem die Quer- und Längsführung separat voneinander behandelt wird. Für die betrachteten wenig komplexen Autobahnsituationen ist dies allerdings akzeptabel.

Bahnplanung

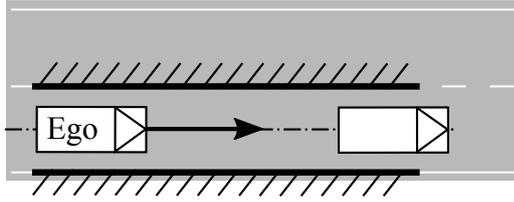
Die Querkomponente der Trajektorienplanungsebene generiert Ortskurven, die das Fahrzeug auf der durch das Situationsanalysemodul vorgegebenen Referenzbahn führen oder innerhalb der Grenzen des Planungsraums einen Querversatz gegenüber dieser aufbauen. Die Reaktion auf dynamische Objekte wie z.B. ein, in den eigenen Fahrstreifen seitlich hineinragendes Fahrzeug, wird alleine der Längsführung überlassen. Das Automationssystem kann ein Hindernis also nur durch ein Fahrstreifenwechselmanöver oder eine Bremsung vermeiden, ein Ausweichen im Fahrstreifen ist nicht möglich. Die Bahnplanung erhält als Eingangsgröße den Bewegungszustand des eigenen Fahrzeuges, eine Referenzbahn sowie die linke und rechte Grenze des Planungsraums. Im Rahmen dieser Arbeit entspricht die Referenzbahn immer dem Mittenverlauf eines Fahrstreifens und weist bereits eine vom Fahrzeug befahrbare krümmungsstetige Form auf. Die linke und rechte Grenze wird relativ zur Referenzbahn in Form eines Querabstands beschrieben.

Fahrstreifenfolgen

Freifahrt

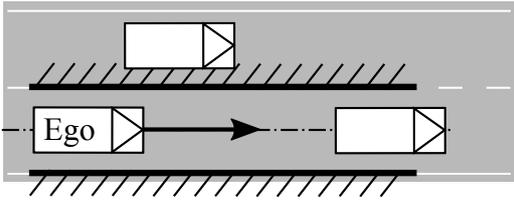


Folgfahrt

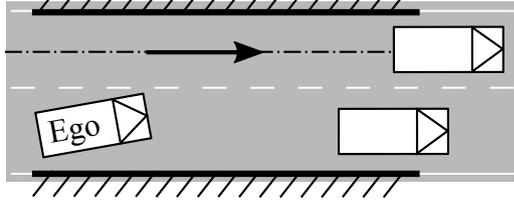


Fahrstreifenwechsel

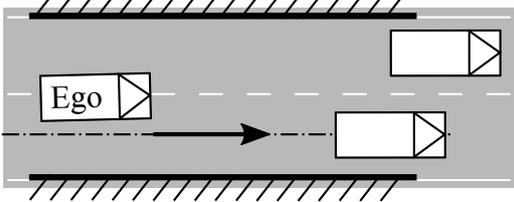
Vorbereitung



Durchführung



Abbruch



Abschluss

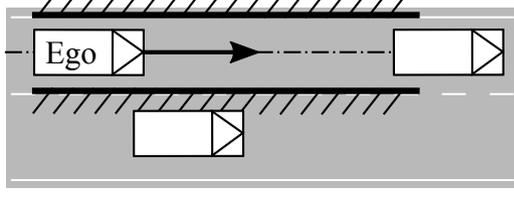


Abbildung 4.6: Exemplarische Darstellung von Planungsraum und relevanten Objekten für die definierten Manöverzustände

Für die Generierung der Sollbahn, werden Polynome 5-ten Grades eingesetzt, wie sie auch bei Werling et al. (2010) oder Lee und Litkouhi (2012) verwendet werden. Diese Polynome lassen sich über Gleichung 4.1 beschreiben.

$$d(t) = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3 + c_4 \cdot t^4 + c_5 \cdot t^5 \quad (4.1)$$

Die Größe $d(t)$ bezeichnet den Querabstand des Fahrzeugs zur Referenzbahn über die Zeit. Die Planung erfolgt demnach wie bei Werling et al. (2010) im Frenét-Raum relativ zur Referenzbahn (vgl. Abbildung 2.5). Das Polynom weist sechs Koeffizienten c_n auf,

wodurch es sich durch sechs Randbedingungen eindeutig bestimmen lässt. Leitet man Gleichung 4.1 zwei mal ab, so erhält man das Gleichungssystem 4.2.

$$\begin{bmatrix} d \\ \dot{d} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 & t^4 & t^5 \\ 0 & 1 & 2t & 3t^2 & 4t^3 & 5t^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t & 12t^2 & 20t^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Indem man den initialen Bewegungszustand des Fahrzeugs in Form von d , \dot{d} und \ddot{d} zum Zeitpunkt $t = 0$ vorgibt sowie den Zielzustand für eine Zeit $t = \tau_{ziel}$ definiert, lassen sich die Koeffizienten des Gleichungssystems bestimmen. Als Parameter verbleibt die Zielzeit τ_{ziel} , welche definiert, nach welcher Zeit der geforderte Zielzustand erreicht ist. Abbildung 4.7 stellt exemplarisch den Verlauf der Zustandsgrößen des Modells für einen Startzustand $d = \dot{d} = \ddot{d} = 0$ hin zu einem Zielzustand $d = 4$, $\dot{d} = \ddot{d} = 0$ mit einer Zielzeit $\tau_{ziel} = 4$ s dar, wie er z.B. für ein Fahrstreifenwechselmanöver geeignet wäre.

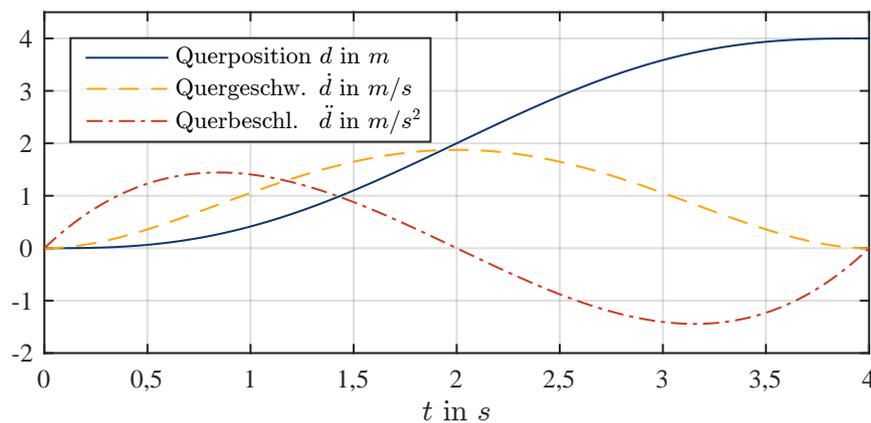


Abbildung 4.7: Exemplarischer Verlauf der querführungsrelevanten Zustandsgrößen bei einem Fahrstreifenwechselmanöver

Um ausgehend vom Verlauf des Querzustandes des Fahrzeugs über der Zeit eine Ortskurve zu generieren, wird jeder Querposition $d(t)$ eine Längsposition $s(t)$ zugeordnet.

Diese errechnet sich unter Annahme einer konstanten Fahrgeschwindigkeit v_{ego} gemäß Gleichung 4.3.

$$s(t) = t \cdot v_{Ego} \quad (4.3)$$

Eine Herausforderung, die sich bei der Fahrt im Realverkehr mit sensorischer Umfeldwahrnehmung stellt, ist, dass eine einmal geplante Bahn meist nicht bis zum Erreichen deren Endes beibehalten werden kann, sondern die Planung zwischenzeitlich immer wieder an ein sich änderndes Umfeld angepasst werden muss. Dies geschieht, indem zyklisch von einem Punkt auf der zuletzt geplanten Bahn beginnend, eine neue Bahn auf die aktuell aus dem Umfeldmodell generierte Referenzbahn berechnet wird. Abbildung 4.8 verdeutlicht dies für ein Fahrstreifenwechselmanöver, bei dem die Referenzbahn in jedem Planungsschritt ihre Position in d -Richtung variiert. Jede Sekunde wird von einem auf der zuletzt geplanten Bahn liegenden Anknüpfungspunkt eine neue Bahn zu einem auf der aktuellen Referenzbahn liegenden Zielpunkt geplant. Da jedes neu berechnete Polynom über die drei Zustandsgrößen d , \dot{d} und \ddot{d} an das zuletzt berechnete Polynom anschließt, resultiert ein komfortabler krümmungsstetiger Gesamtverlauf.

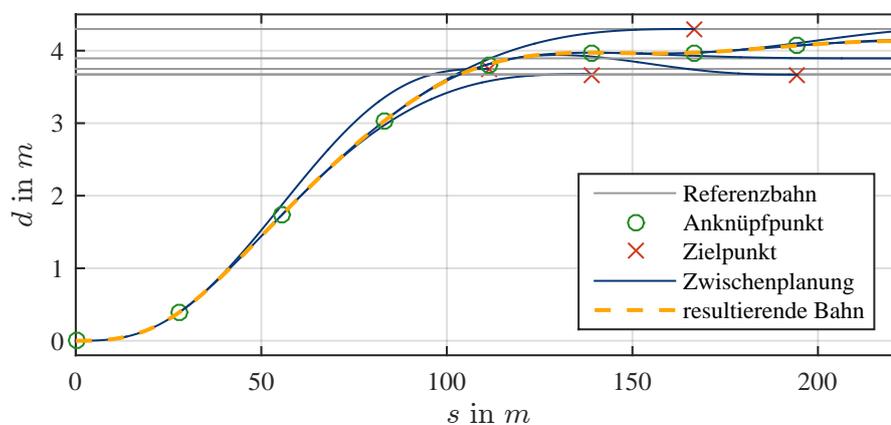


Abbildung 4.8: Aufeinanderfolgende Planungsschritte bei variabler Referenzbahn ($\tau_{ziel} = 4$ s, Fahrgeschwindigkeit 100 km/h, Neuplanungsfrequenz 1 Hz)

In jedem Planungsschritt wird der im Umfeldkoordinatensystem (x, y) beschriebene Startzustand in den Frenét-Raum (d, s) transformiert, um anschließend eine Bahn zum ebenfalls im Frenét-Raum beschriebenen Zielpunkt zu berechnen. Ein Zielpunkt ist in Form einer Zielzeit τ_{ziel} sowie einem Querabstand zur Referenzbahn d_{ziel} beschrieben. Im Normalfall ist dieser Querabstand Null. Das Ergebnis der Berechnung wird durch Superposition der geplanten Bahn mit der Referenzbahn in das kartesische Umfeldkoordinatensystem zurücktransformiert und der Stabilisierungsebene übergeben. Für

weitere Informationen zur Planung im Frenét-Raum sei auf Werling et al. (2010) verwiesen.

Tabelle 4.1 stellt die zur Beeinflussung des Querführungsverhaltens existierenden Parameter dar. Im Gegensatz zu Werling et al. (2010), wird bei dem hier verwendeten Planungsansatz keine Trajektorienschar berechnet und anschließend per Kostenfunktion selektiert, sondern nur eine Bahn mit festen Parametern generiert. Die berechnete Bahn wird anschließend hinsichtlich einer maximal erlaubten Querbeschleunigung sowie der Einhaltung der Grenzen des Planungsraums bewertet. Werden die definierten Grenzen überschritten, erfolgt eine iterative Anpassung von τ_{ziel} bis die Grenzen erreicht werden. Durch die Vorgabe der Referenzbahn gemäß den Beispielen aus Abbildung 4.6 können die Querführungsanteile des Fahrstreifenfolge und -wechselmanövers umgesetzt werden. Je kleiner die Zielzeit τ_{ziel} gewählt wird, desto höher ist die Querbeschleunigung und der Ruck, die das Fahrzeug auf die vorgegebene Referenzbahn führen.

Tabelle 4.1: Parameter zur Anpassung des Querführungsverhaltens der Bahnplanung

Parameter	Erklärung
d_{ziel}	Lateraler Zielabstand des Fahrzeugs zum Referenzpfad
τ_{ziel}	Sollzeit für das Erreichen des lateralen Zielabstands

Längsführung

Die Längskomponente der Trajektorienebene hat die Aufgabe, die Fahrgeschwindigkeit an sich ändernde Sollgeschwindigkeiten sowie längsführungsrelevante Fahrzeuge anzupassen. Für die Generierung der Längsbewegung kommen übliche Methoden zur Regelung von Geschwindigkeit und Abstand zum Einsatz. Bei dem genutzten Ansatz handelt es sich um eine reaktive Komponente, die im Gegensatz zur Bahnplanung keinen planenden Charakter besitzt. Das Längsführungsmodul erhält als Eingangsgröße den Bewegungszustand des eigenen Fahrzeuges, die von der Bahnplanung berechnete Bahn, eine Zielgeschwindigkeit und die Position sowie den Bewegungszustand eines oder mehrerer längsführungsrelevanter Objekte. Die Objekte werden zunächst in einer Teilkomponente des Längsführungsmoduls, der sogenannten Zielobjektauswahl, der geplanten Bahn zugeordnet. Nur potentiell mit der Bahn kollidierende Objekte werden in den weiteren Verarbeitungsschritten berücksichtigt. Ausgangsgröße ist eine Sollbeschleunigung, welche der Stabilisierungsebene übergeben wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wird, wie später in Abschnitt 4.3 beschrieben, für die Längsführung das Serien-ACC-System des eingesetzten Versuchsfahrzeugs genutzt. Dieses arbeitet nach dem Prinzip der Sliding-Mode-Regelung, welche beispielsweise von Eigel (2010) beschrieben wird. Im Folgenden wird für das Verständnis der prinzipiellen Wirkzusammenhänge eine vereinfachte Regelung nach Winner und Schopper (2015) erläutert, die der Funktionsweise des Serien-ACCs jedoch sehr ähnelt.

Die Modellgleichung für die Geschwindigkeitsregelung kann nach Winner und Schopper (2015) als einfaches Proportionalglied beschrieben werden. Gemäß Gleichung 4.4 wird in Abhängigkeit der Zielgeschwindigkeit v_{ziel} sowie der Istgeschwindigkeit v_{ist} eine Sollbeschleunigung $a_{soll,v}$ berechnet. Eine Zeitkonstante τ_v dient als Parameter für den Geschwindigkeitsregler.

$$a_{soll,v} = \frac{v_{ziel} - v_{ist}}{\tau_v} \quad (4.4)$$

Die Folgeregelung hat einerseits die Aufgabe die Fahrgeschwindigkeit an die eines längsführungsrelevanten Objekts anzupassen und andererseits einen bestimmten Abstand gegenüber diesem einzustellen. Dies wird über Gleichung 4.5 beschrieben (Winner & Schopper, 2015).

$$a_{soll,o} = \frac{(v_{objekt} - v_{ist}) - \frac{dx_{objekt} - dx_{ziel}}{\tau_{dx}}}{\tau_{dv}} \quad (4.5)$$

In die berechnete Sollbeschleunigung $a_{soll,o}$ fließt zum einen die Istgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Ego-Fahrzeug (v_{ist}) und längsführungsrelevantem Objekt (v_{objekt}) über die Zeitkonstante τ_{dv} ein. Zum anderen wird die Differenz aus Zielabstand dx_{ziel} und Istabstand dx_{objekt} über die Zeitkonstante τ_{dx} einbezogen. Für alle Größen wird jeweils der Bewegungsanteil in Fahrzeuglängsrichtung betrachtet.

Je nach Fahrsituation können mehrere längsführungsrelevante Objekte vorhanden sein (z.B. bei einem nicht rechts zu überholenden Fahrzeug links neben der geplanten Bahn). Für jedes dieser Objekte errechnet sich folglich eine Sollbeschleunigung gemäß Gleichung 4.5. Als Ergebnis des Längsführungsmodells werden die Sollbeschleunigungen aus der Geschwindigkeitsreglergleichung und einer oder mehrerer Objektfolgereglergleichungen durch eine Minimumbildung kombiniert (Gleichung 4.6).

$$a_{soll} = \min(a_{soll,v}, a_{soll,o,1}, \dots, a_{soll,o,n}) \quad (4.6)$$

Für die Gestaltung des automatisierten Längsführungsverhaltens liefert das vorgestellte Modell drei Parameter in Form der beschriebenen Zeitkonstanten. Als weitere Parameter existieren die Sollgeschwindigkeit sowie der Abstand bzw. die Abstände zu längsführungsrelevanten Objekten. Der Abstand dx_{ziel} kann optional auch in Form einer sogenannten Zeitlücke $\tau_{x,ziel}$ beschrieben werden. dx_{ziel} berechnet sich in diesem Fall durch $dx_{ziel} = \tau_{x,ziel} \cdot v_{ist}$. Es handelt sich also um einen mit der Fahrgeschwindigkeit zunehmenden Folgeabstand. Tabelle 4.2 fasst die betrachteten Parameter zur Beeinflussung des Längsführungsverhaltens zusammen.

Tabelle 4.2: Parameter zur Anpassung des Längsführungsverhaltens

Parameter	Erklärung
τ_v	Zeitkonstante für den Geschwindigkeitsregler
τ_{dx}	Zeitkonstante für den Abstandsregler
τ_{dv}	Zeitkonstante für den Relativgeschwindigkeitsregler
$dx_{ziel} / \tau_{x,ziel}$	Longitudinaler Zielabstand bzw. Zielzeitlücke zu längsführungsrelevanten Objekten
v_{ziel}	Zielgeschwindigkeit

Abbildung 4.9 verdeutlicht den Einfluss der einzelnen Parameter des Objektfolgereglers. Dazu ist auf der rechten Seite die Relativgeschwindigkeit dv über dem Abstand dx zu einem langsameren Vorderobjekt aufgetragen. Das Fahrzeug bewegt sich während der Annäherung im $dx-dv$ -Raum von rechts unten zum Zielpunkt ($dv = 0$ und $dx = dx_{ziel}$). Der Parameter τ_{dx} bestimmt die Steigung der schwarz eingezeichneten Schaltgeraden. Je kleiner τ_{dx} desto flacher ist diese Gerade und umso früher wird eine negative Beschleunigung aufgebaut. Der Parameter τ_{dv} bestimmt die Stärke, mit der das Fahrzeug auf die Schaltgerade gezwungen wird. In der Grafik sind drei Annäherungen mit $\tau_{dv} = [5,0; 2,0; 0,5]$ dargestellt. Während das Fahrzeug bei $\tau_{dv} = 5,0$ deutlich in die Zeitlücke eintaucht, wird es bei niedrigerem τ_{dv} durch eine höhere Beschleunigung deutlich stärker auf die Schaltgerade gebremst.

4.2.5 Stabilisierungsebene

Aufgabe der Stabilisierungsebene ist es, die Aktoren des Fahrzeugs so anzusteuern, dass dieses den Vorgaben aus Bahnplanung und Längsführung folgt. Diese Aufgabe erfüllt

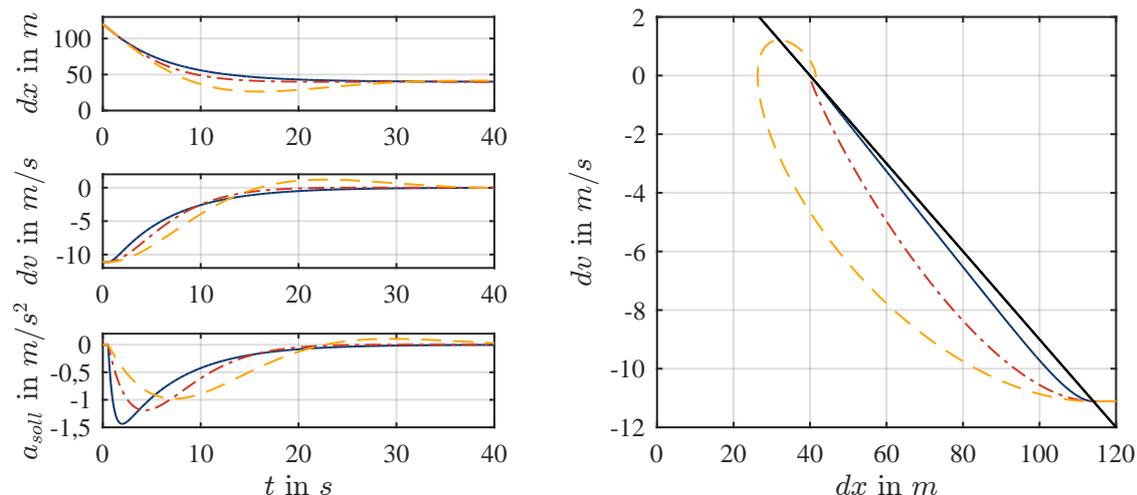


Abbildung 4.9: Auswirkung der Längsführungsparameter auf den Annäherungsvorgang

eine Kombination aus Bahnfolge- und Beschleunigungsregler. Für ersteren sei auf die Arbeit von Kritayakirana und Gerdes (2009) verwiesen, an der sich der verwendete Regler orientiert. Ansätze zur Beschleunigungsregelung sind in Mayr (2001) zu finden.

Analog zur Trajektorienebene kann auch das Fahrverhalten auf Stabilisierungsebene angepasst werden. So ist es möglich eine „härtere“ Regelung mit genauerer Sollwertfolge oder eine „weichere“ Regelung, die dem Sollwert mit geringerer Genauigkeit folgt zu realisieren. Da der genaue Aufbau der Regler auf Stabilisierungsebene nicht Fokus dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen. Tiefergehende Informationen finden sich ebenfalls in Mayr (2001).

4.3 Implementierung

Für die im nachfolgenden Kapitel durchgeführten Untersuchungen wird das entwickelte System in ein Versuchsfahrzeug integriert.

4.3.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsträger kommen verschiedene Audi Fahrzeuge des Modells A6 Avant und A7 Sportback zum Einsatz. Als relevante Sonderausstattung verfügen dieser über ein ACC-System, einen Spurhalteassistenten sowie einen Totwinkelwarner. Im Fahrzeug sind damit bereits ab Werk mehrere Sensoren für die propriozeptive und exterozeptive

Wahrnehmung verbaut. Zur Messung von Beschleunigung und Gierrate in allen drei Raumrichtungen dient die Inertialsensorik des serienmäßig verbauten ESC-Steuergeräts. Zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfeldes dienen zwei weitsichtige, in Fahrtrichtung blickende Radarsensoren, eine Front-Kamera sowie zwei zurückblickende Radarsensoren mit mittlerer Reichweite.

Zusätzlich zu diesen Serienkomponenten ist im Fahrzeug weitere Sensorik und Rechnerhardware verbaut. Zur Lokalisierung befindet sich ein hochgenaues DGPS (Differential Global Positioning System) mit integrierter Inertialsensorik im Fahrzeug (iMAR, 2012). Als zusätzliche Rechnerhardware sind zwei Windows-PCs sowie eine dSPACE AutoBox im Kofferraum des Fahrzeugs verbaut. Auf den PCs läuft das Entwicklungsframework ADTF (Automotive Data and Time triggered Framework), welches die modulare Entwicklung von Softwarekomponenten auf C++ Basis ermöglicht. Die AutoBox erlaubt die Ausführung von, mit der Software Simulink erstellten Modellen. Die PCs und die AutoBox sind mit den Bussystemen des Fahrzeugs verbunden. Zusätzliche Hardwarekomponenten ermöglichen darüber hinaus die Manipulation der Buskommunikation des Fahrzeugs zur Ansteuerung von bestehenden Fahrzeugsystemen wie Antriebsstrang, Bremssystem, Lenkung und Fahrtrichtungsanzeiger.

4.3.2 Prototypisch umgesetzte Teilkomponenten

Das Gesamtsystem orientiert sich grundsätzlich an der in Abbildung 4.1 dargestellten Struktur. Einzelne Teilkomponenten werden jedoch zur Erhöhung der Robustheit des Systems für die Zwecke der durchgeführten Probandenstudien auf eine andere Weise realisiert als dies für ein künftiges Serienfahrzeug zielführend wäre.

Fahrbahnwahrnehmung Anstelle einer auf Umfeldsensorik basierenden Fahrbahnwahrnehmung wird das von der Fahrfunktion genutzte Fahrbahnmodell aus einer hochgenauen digitalen Karte gewonnen. Die Lokalisierung erfolgt mittels DGPS-System. Dies bietet den Vorteil einer hohen Sicherheit und Verfügbarkeit auch bei, z.B. durch Witterungseinflüsse nur schwer sichtbaren oder nicht vorhandenen Fahrbahnmarkierungen. Diese Umsetzung stellt hohe Anforderungen an Aktualität und Genauigkeit der genutzten Kartendaten. Aufgrund des überschaubaren zeitlichen Rahmens und der für die Versuche begrenzten Streckenabschnitte, stellen diese Anforderungen jedoch kein Problem dar.

Längsführung Da im Fahrzeug bereits ein im Serieneinsatz erprobtes ACC-System verbaut ist, wird dieses, wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, für die Umfänge dieser Arbeit genutzt. Das Serien-System basiert grundsätzlich auf dem in Kapitel 4.2.4 erläuterten Modell und eine Vorgabe der dort beschriebenen Parameter ist durch Eingriffe in die Steuergerätparametrierung möglich. Ebenfalls werden die bereits im Seriensteuergerät verfügbaren Algorithmen für Objektdetektion und -tracking auf Basis der Radarsensordaten sowie die Zielobjektauswahl genutzt.

Navigation und Manöverentscheidung Die Softwarekomponenten auf Navigations- und Manöverebene befinden sich zum Zeitpunkt des Versuchs noch im Entwicklungsstadium. Um die Ergebnisse der durchzuführenden Studien nicht durch eine eingeschränkte Zuverlässigkeit dieser Komponenten zu beeinflussen, wird eine sogenannte Wizard-of-Oz Methodik angewandt. Bei der in G. Schmidt, Kiss, Babbel und Galla (2008) beschriebenen Methode werden Aufgaben eines komplexen technischen Systems durch einen Menschen (den sogenannten Wizard) simuliert. Der Nutzer des Systems kann dadurch bereits den vollen Funktionsumfang des Systems erleben, bevor eine vergleichbare technische Umsetzung existiert. Im beschriebenen Versuchssystem interagiert der Wizard auf Navigations- und Manöverebene mit dem System. Er hat einerseits die Aufgabe die Systemgrenzen zu überwachen und beim Erreichen einer Grenze, wie z.B. dem Erreichen des Endes einer freigegebenen Strecke, eine Übernahmeaufforderung auszulösen. Andererseits übernimmt er Aufgaben des in Abbildung 4.3 dargestellten Situationsanalysemoduls, indem er die Motivation für ein Fahrstreifenwechselmanöver bestimmt. Darüber hinaus gibt er als letzte Instanz die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels frei, indem er die Verkehrssituation auf dem Zielfahrstreifen überwacht. Die Fahraufgabe auf Trajektorien- und Stabilisierungsebene wird vollständig vom Automationssystem ausgeführt.

Abbildung 4.10 stellt die auf Basis von Abbildung 4.1 abgewandelte Architektur des Versuchssystems dar. Das Gesamtsystem verteilt sich auf die drei Hardwarekomponenten Fahrzeugrechner, ACC-Steuergerät und AutoBox. Die Generierung des Fahrbahnmodells, die Eigenbewegungsschätzung sowie die Module der Funktionssteuerung, Manöverentscheidung und Bahnplanung sind im Entwicklungsframework ADTF auf dem Fahrzeugrechner umgesetzt. Die Längsführung, inklusive der Einregelung einer Sollbeschleunigung im sogenannten Triebstrangkoordinator sowie die Objektwahrnehmung erfolgt auf dem ACC-Steuergerät. Die Stabilisierung der geplanten Bahn bewerkstelligt ein Bahnfolgeregler auf der AutoBox. Zur Übermittlung von Informationen an den Fahrer dienen Bedien- und Anzeigeelemente im Cockpit des Fahrzeugs. Der Wizard erhält als Eingabeelement den sogenannten Wizard-Controller, welcher mit dem Fahrzeugrechner verbunden ist. Der in Abbildung 4.10 nicht dargestellte zweite Fahrzeugrechner

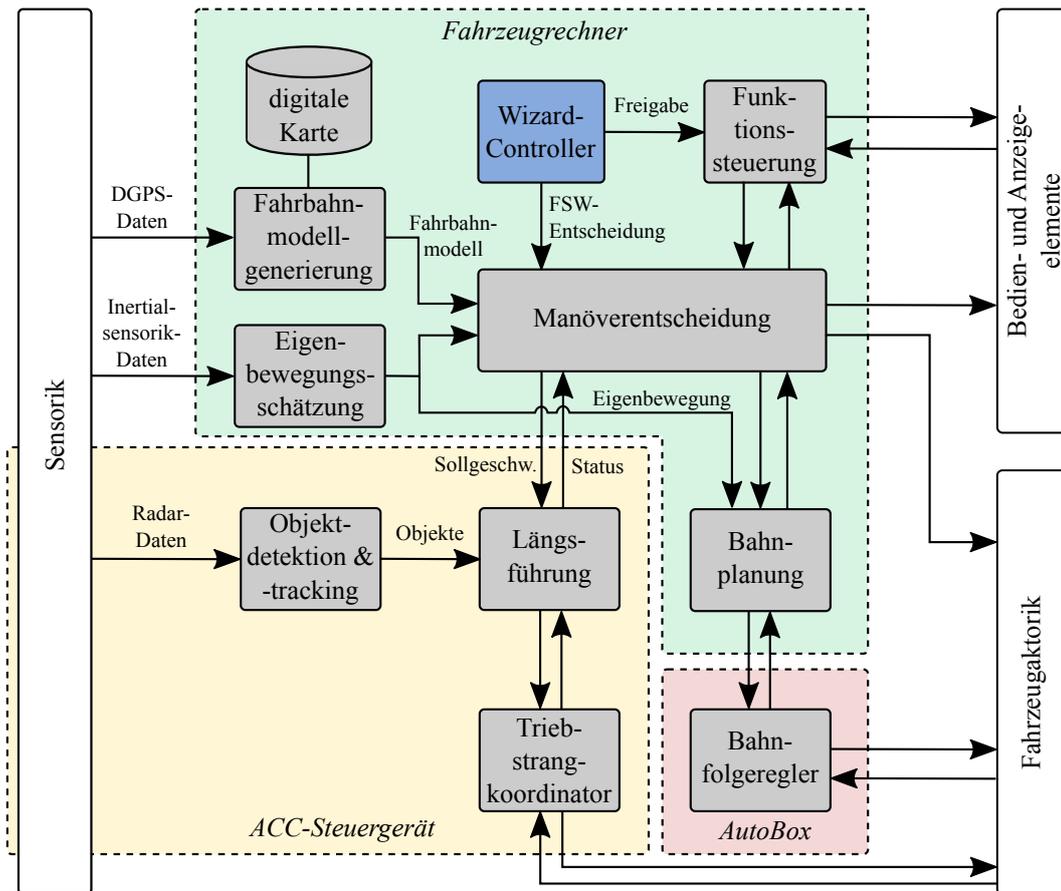


Abbildung 4.10: Gesamtsystemübersicht

fungiert als Logging-PC. Er ist mit allen Bussystemen des Fahrzeugs verbunden und zeichnet relevante Daten des Fahrzeugs sowie des Automationssystems auf. Darüber hinaus nimmt er das Videobild der Front-Kamera sowie einer Fahrerbeobachtungskamera auf.

Abbildung 4.11 stellt dar, wie Fahrer, Automation und Wizard auf die Zustandsautomaten der Funktionssteuerung und Manöverentscheidung einwirken. Zur Aktivierung des Systems müssen Wizard und Automation die Aktivierung freigeben und der Fahrer das System aktivieren. Sowohl die Automation als auch der Wizard können eine Übernahmeaufforderung auslösen. Die Deaktivierung der Automation bzw. die letztendliche Übernahme erfolgt durch den Fahrer. Auf Manöverebene kann der Wizard Fahrstreifenwechselmanöver beauftragen. Dadurch geht der Zustandsautomat des Fahrstreifenwechselmanövers in die Vorbereitungsphase. Für den Beginn der Durchführung des Wechsels müssen die Automation und der Wizard diesen freigeben. Während des gesamten Fahrstreifenwechsels kann der Wizard oder die Automation das Manöver abbrechen.

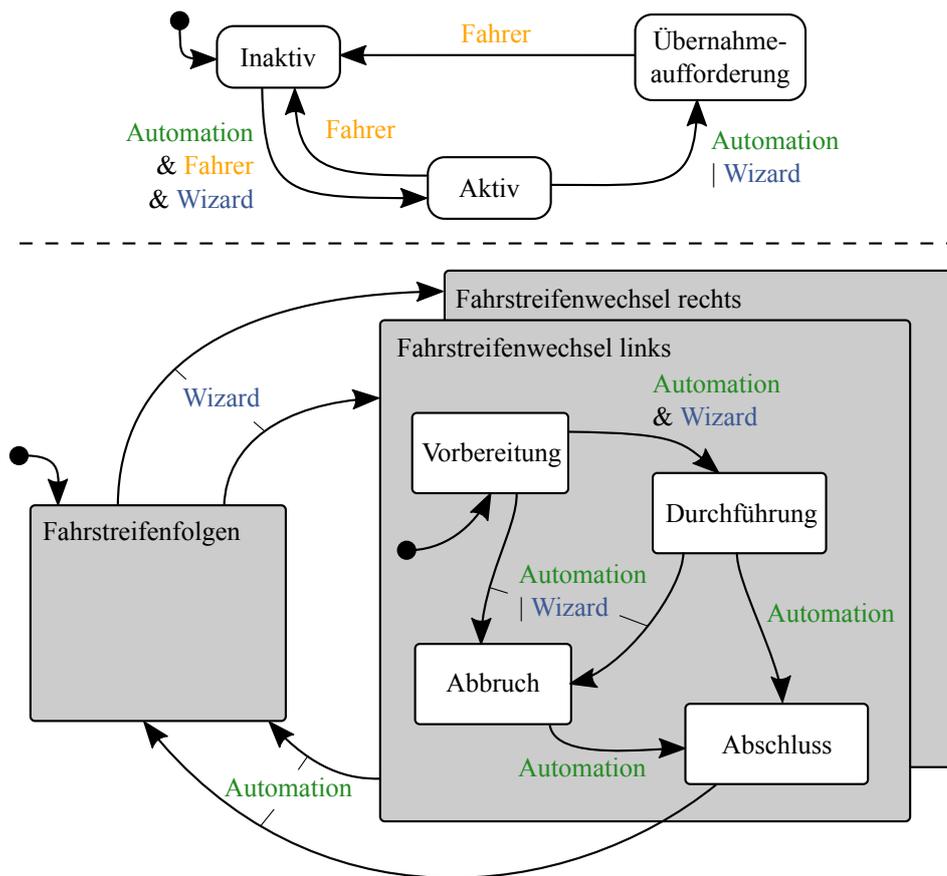


Abbildung 4.11: Integration des Wizards auf Manöverebene

4.4 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurden die wichtigsten Komponenten des Automationssystem beschrieben, welches die Basis der in den folgenden zwei Kapiteln durchgeführten Studien bildet. Festzuhalten ist, dass die Aufgaben der Navigations- und Manöverebene größtenteils durch eine menschliche Komponente, den sogenannten Wizard, übernommen werden. Dieser kann über ein Eingabeelement bestimmte Transitionen in den Zustandsautomaten des Automationssystem beeinflussen. Die Funktionalität auf Trajektorien- und Stabilisierungsebene wird vollständig vom Automationssystem realisiert. Auf Trajektorienebene werden Quer- und Längsführung getrennt voneinander betrachtet. Die Querführung übernimmt ein neu entwickeltes Bahnplanungsmodul, die Längsführung wird von dem bereits im Versuchsfahrzeug verbauten ACC-System übernommen. Das genutzte Fahrbahnmodell stützt sich auf eine hochgenaue digitale Karte, welche für die in den Fahrversuchen genutzten Strecken zur Verfügung steht. Das Automationssystem ist in der Lage, alle in Kapitel 3 (Tabelle 3.3) beschriebenen Fahrmanöver abzubilden. Das Bewegungsverhalten innerhalb der Fahrmanöver lässt sich über mehrere Parameter (Tabelle 4.1 und 4.2) anpassen.

5 Akzeptierte Dynamik der Fahrzeugbewegung (Studie 1)

In diesem Kapitel wird eine Probandenstudie beschrieben, die der ersten Forschungsfrage aus Abschnitt 2.6 nachgeht. Ziel der Studie ist es zum einen, die Akzeptanz von spürbaren Fahrzeugbewegungen im Kontext des automatisierten Fahrens zu bewerten und zum anderen Schwellenwerte für die akzeptierte Dynamik vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 beschriebenen Bewegungsrückmeldung zu ermitteln. Die Ergebnisse dienen außerdem als Grundlage für die Gestaltung des Fahrverhaltens der zweiten Studie dieser Arbeit. Die Inhalte dieses Kapitels sind in Teilen auch bei Lange, Maas, Albert, Siedersberger und Bengler (2014) zu finden. Einen Überblick über die Studie gibt Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Studienübersicht: Akzeptierte Dynamik beim automatisierten Fahren

Forschungsfragen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Wünscht bzw. akzeptiert der Fahrer spürbare Fahrzeugbewegungen beim automatisierten Fahren? 2. Welche Querdynamik akzeptiert der Fahrer beim automatisierten Fahrstreifenwechselmanöver?
Ziele	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aussage zur grundsätzlichen Akzeptanz von spürbarer Fahrdynamik beim automatisierten Fahren 2. Schwellenwert für die akzeptierte Querdynamik beim automatisierten Fahrstreifenwechsel
Methodik	Fragebogen und Realfahrversuch (Herstellmethode)
Unabh. Variable	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rolle des Fahrers (Überwacher oder nicht) 2. Fahrgeschwindigkeit
Abh. Variablen	Akzeptierte Dynamik der Fahrzeugbewegung / Fahrstreifenwechselzeit

5.1 Fragestellung und Hypothesengenerierung

Wie in Kapitel 2.5.2 dargelegt, existieren hinsichtlich der vom Menschen in Längsrichtung akzeptierten Fahrzeugbewegung bereits Erfahrungen aus der Entwicklung des Assistenzsystems ACC (vgl. Abschnitt 2.5.2). Akzeptierte Dynamiken in höheren Automationsstufen sowie Akzeptanzschwellen für die automatisierte Querbewegungen sind dahingegen bisher kaum untersucht worden. Die hier beschriebene Studie setzt an dieser Stelle an. Dazu wird die Akzeptanz vestibulärer Reize beim automatisierten Fahren zunächst qualitativ mit folgender Fragestellung untersucht:

Fragestellung 1: Wünscht bzw. akzeptiert der Fahrer spürbare Fahrzeugbewegungen beim automatisierten Fahren?

Für die Ermittlung quantitativer Aussagen wird diese Fragestellung auf die automatisierte Querbewegung fokussiert. Daher erfolgt eine Betrachtung des Fahrstreifenwechsels als für die automatisierte Autobahnfahrt querdynamisch relevantestes Manöver. Es resultiert folgende Fragestellung:

Fragestellung 2: Welche Querdynamik akzeptiert der Fahrer beim automatisierten Fahrstreifenwechsel?

Zur Operationalisierung des Begriffs Querdynamik im Kontext des Fahrstreifenwechselmanövers dient die bereits in Kapitel 2.5.2 beschriebene Fahrstreifenwechselzeit t_{fsw} . Diese wird definiert als die Zeit zwischen der parallelen Ausrichtung des Fahrzeugs auf dem Startfahrstreifen und der ebenfalls parallelen Ausrichtung des Fahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen (vgl. Sporrer et al., 1998).

Ergebnisse aus der Literatur zeigen, dass das Komfortempfinden sowie die vom Fahrer gewählte Dynamik von diversen Einflussfaktoren abhängen. Diese sind z.B. das gefahrene Manöver (Bellem et al., 2016), die Konstellation der umgebenden Verkehrsteilnehmer während eines Manövers (Fastenmeier et al., 2001) sowie die Fahrgeschwindigkeit (Schimmelpfennig & Nackenhorst, 1985). Ein weiterer Einflussfaktor, der sich durch den Kontext des automatisierten Fahrens ergibt, ist die Rolle des Fahrers bzw. der Automationsgrad (vgl. Tabelle 2.2). Im Rahmen der durchgeführten Studie wird lediglich das Manöver Fahrstreifenwechsel betrachtet. Der Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer wird dabei nicht berücksichtigt. Untersuchte Faktoren sind die *Rolle des Fahrers* sowie die *Fahrgeschwindigkeit*. Hinsichtlich der Rolle des Fahrers wird unterschieden, ob dieser die Fahrzeugführung überwacht oder nicht. Für die Fahrgeschwindigkeit werden die beiden Stufen 30 km/h und 60 km/h berücksichtigt. Auf Grund der begrenzten Länge

der genutzten Teststrecke muss auf höhere Geschwindigkeitsbereiche verzichtet werden. Aufbauend auf den genannten Faktoren werden folgende Hypothesen formuliert:

Hypothese 1: Die akzeptierte Fahrstreifenwechselzeit eines überwachenden und eines nicht überwachenden Fahrers ist unterschiedlich.

Hypothese 2: Die akzeptierte Fahrstreifenwechselzeit bei einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h unterscheidet sich von der bei 60 km/h .

5.2 Versuchsdesign

5.2.1 Probandenkollektiv

An der Studie nehmen 32 erfahrene Autofahrer mit einer mittleren Fahrleistung von 25000 km/Jahr teil. Die Probanden sind im Durchschnitt 30 Jahre alt, die älteste Person ist 54, die jüngste 25 Jahre alt. 93% der Befragten geben an, bereits Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen zu haben, die aktiv in die Querführung des Fahrzeugs eingreifen. 27 Teilnehmer sind männlich. Die Ergebnisse einer Befragung zum Fahrstil der Probanden in Anlehnung an Arndt (2010) ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

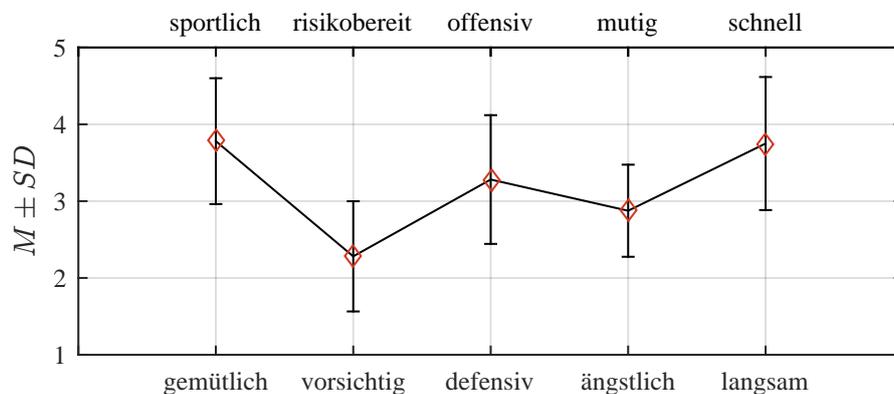


Abbildung 5.1: Ergebnisse zum Fahrstil der Probanden („Im Vergleich zu anderen Autofahrern fahre ich überwiegend ...“)

5.2.2 Versuchsaufbau

Für den Fahrversuch wird das in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Versuchsfahrzeug eingesetzt. Die Durchführung erfolgt auf einer dreistreifigen autobahnähnlichen Strecke auf

dem Prüfgelände der AUDI AG, wie sie in Abbildung 5.2 skizziert ist. An den beiden Enden der Strecke muss jeweils gewendet werden. Es findet jeweils ein automatisierter Fahrstreifenwechsel zwischen den zwei Wendepunkten statt. Sowohl das Wendemanöver, als auch die Beschleunigungsphase werden in manueller Fahrt durchgeführt.

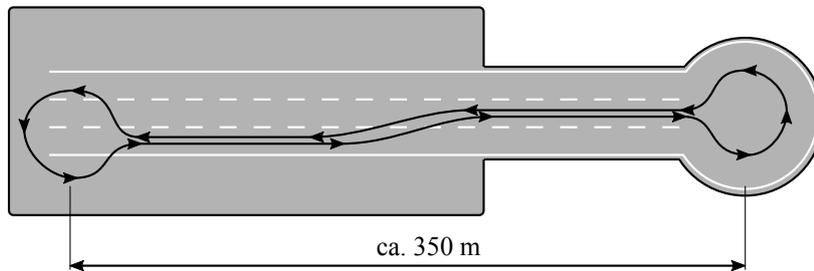


Abbildung 5.2: Versuchsgelände und gefahrene Strecke für den Fahrversuch

Für die Generierung der Fahrstreifenwechselbahn kommt der in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Bahnplanungsansatz zum Einsatz. Für den Fahrstreifenwechsel muss die Bahnplanung einen, über den Versuch konstanten, Querversatz um eine Fahrstreifenbreite aufbauen. Die dafür verfügbare Fahrstreifenwechselzeit t_{fsw} wird variiert. Unter Verwendung des in Gleichung 4.2 beschriebenen quintischen Polynoms resultieren dabei je nach gewähltem t_{fsw} unterschiedliche auf den Fahrer wirkende Dynamikgrößen. Abbildung 5.3 stellt die Maximalwerte der mit dem verwendeten Polynomansatz beim Fahrstreifenwechsel auftretenden Dynamikgrößen in Abhängigkeit von t_{fsw} dar. Auf dem Versuchsgelände liegen Fahrstreifen einer Breite von 3,75 m vor. Die während des Fahrstreifenwechsels maximal auftretende Querb beschleunigung $a_{y,max}$ sowie deren zeitliche Ableitung, der Ruck $j_{y,max}$, sind geschwindigkeitsunabhängig, die Gierrate $\dot{\psi}_{max}$ sowie deren zeitliche Ableitung $\ddot{\psi}_{max}$ steigen mit sinkender Fahrgeschwindigkeit. Bis auf die Gierrate, die visuell wahrgenommen wird, kann der Fahrer die dargestellten Größen, sofern sie über seiner Wahrnehmungsschwelle liegen, vestibulär wahrnehmen (vgl. Abschnitt 2.4).

5.2.3 Versuchsdurchführung

Für die Beantwortung von Fragestellung 1 erfolgt zu Beginn der Studie eine Befragung mittels Fragebogen. Dieser erfragt qualitativ die von den Probanden gewünschte Dynamik der Fahrzeugbewegung beim automatisierten Fahren und geht dabei auch auf den Aspekt der Rückmeldung ein. Im Fragebogen wird unterschieden, ob der Fahrer das Fahrgeschehen überwachen muss oder nicht. Tabelle 5.2 zeigt den Abschnitt des Fragebogens zur grundsätzlichen Akzeptanz von spürbarer Fahrdynamik beim automatisierten Fahren, für den Fall, dass der Fahrer noch in der Überwacherrolle ist.

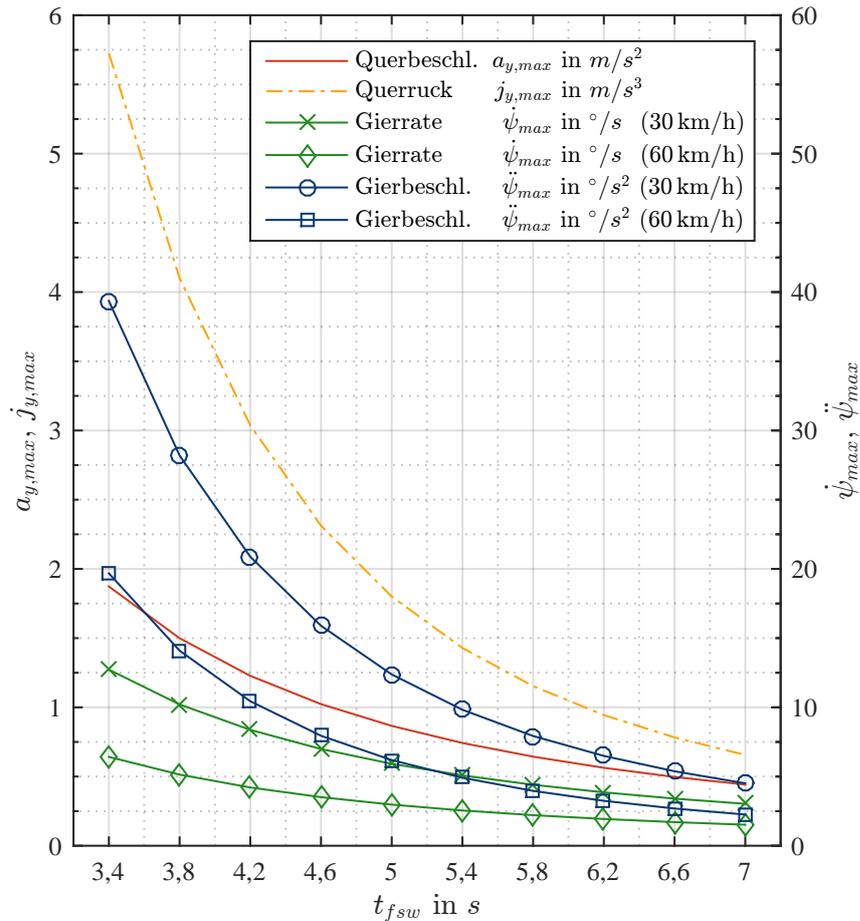


Abbildung 5.3: Ausgewählte Querdynamikgrößen in Abhängigkeit von der Fahrstreifenwechselzeit (Fahrstreifenwechselbahn beschrieben durch quintisches Polynom, Fahrstreifenbreite 3,75 m)

Im Anschluss an den Fragebogen wird beziehend auf Fragestellung 2 der Fahrversuch im Versuchsfahrzeug durchgeführt. Dabei werden automatisierte Fahrstreifenwechsel auf freier Fahrbahn ohne Vorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer durchgeführt. Es werden die Faktoren „Fahrgeschwindigkeit“ und „Rolle des Fahrers“ variiert. Zur Ermittlung der akzeptierten Querdynamik wird eine Methode aus dem Forschungsgebiet der Psychophysik angewandt. Die Methode der Herstellung nach Fechner (1860) dient im allgemeinen der Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen (vgl. Abschnitt 2.4.3). Im durchgeführten Versuch wird sie zur Messung der akzeptierten Dynamik eingesetzt. Der Proband hat dazu die Aufgabe, sich die Querdynamik eines Fahrstreifenwechsels (physikalisch messbare Größe) selbst einzustellen. Auslegungsziel ist eine deutlich spürbare, aber noch akzeptierte Querdynamik (subjektiver Eindruck). Das Auslegungsziel ist auf diese Art und Weise formuliert, um sicherzustellen, dass der Proband nicht seine präferierte Dynamikeinstellung wählt, sondern sich bewusst an seine Akzeptanzschwelle

Tabelle 5.2: Fragebogen zur gewünschten Dynamik der Fahrzeugbewegung beim automatisierten Fahren

Wie viel Dynamik möchten Sie beim teilautomatisierten Fahren? (Das Fahrzeug fährt selbständig, während Sie das Fahrgeschehen jedoch noch überwachen müssen) Mehr als eine Antwort möglich!

1. Ich möchte so wenig Dynamik wie möglich, um möglichst hohen Komfort zu erreichen.

 2. Ich wünsche mir eine gewisse Dynamik, um die Absichten und Aktionen des Fahrzeugs zu erkennen.

 3. Ich kann mir vorstellen, dass ich beim automatisierten Fahren manchmal auch Spaß an deutlich spürbarer Fahrdynamik habe.

 4. Ich kann mir unter Dynamik beim automatisierten Fahren nichts vorstellen.
-

annähert. Dazu soll er, ausgehend von einer zufällig gewählten Startdynamik, in mehreren Iterationen die Fahrstreifenwecheldynamik solange erhöhen oder senken, bis er der Meinung ist, das Auslegungsziel erreicht zu haben. Dem Probanden stehen zehn wählbare Dynamikstufen zur Auswahl, die im Intervall $t_{fsw} = 3,4 - 7,0 s$ liegen. Jeder Proband hat die Aufgabe, sich zweimal von einer zufällig gewählten Anfangsstufe an das Auslegungsziel heran zu iterieren. Daraus ergeben sich zwei Messwerte für die akzeptierte Fahrstreifenwechselzeit je Proband und Kombination der unabhängigen Variablen. Der Proband weiß den Wert der eingestellten Stufe selbst nicht, sondern kann die Dynamik lediglich stufenweise erhöhen oder senken. Der Versuch wird für einen überwachenden sowie einen nicht überwachenden Fahrer jeweils mit $30 km/h$ und $60 km/h$ durchgeführt. Der überwachende Fahrer sitzt auf dem Fahrersitz und beobachtet das Fahrgeschehen. Der nicht überwachende Fahrer sitzt auf dem Rücksitz des Fahrzeugs und erhält eine Zeitschrift, der er seine Aufmerksamkeit widmen soll.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Befragung

Das Balkendiagramm in Abbildung 5.4 stellt die Ergebnisse des Fragebogens dar. Dabei wird unterschieden zwischen Probanden, welche eine eindeutige Antwort auf die Frage in Tabelle 5.2 gegeben haben (z.B. ich möchte nur Komfort) und solche, die zwei benachbarte Aussagen angekreuzt haben (z.B. ich möchte Komfort, aber auch eine

gewisse Rückmeldung). Zwei Probanden im Überwachungsfall und ein Proband im unüberwachten Fall sind in dieser Darstellung nicht abgebildet, da sie alle drei Aussagen aus Tabelle 5.2 angekreuzt haben.

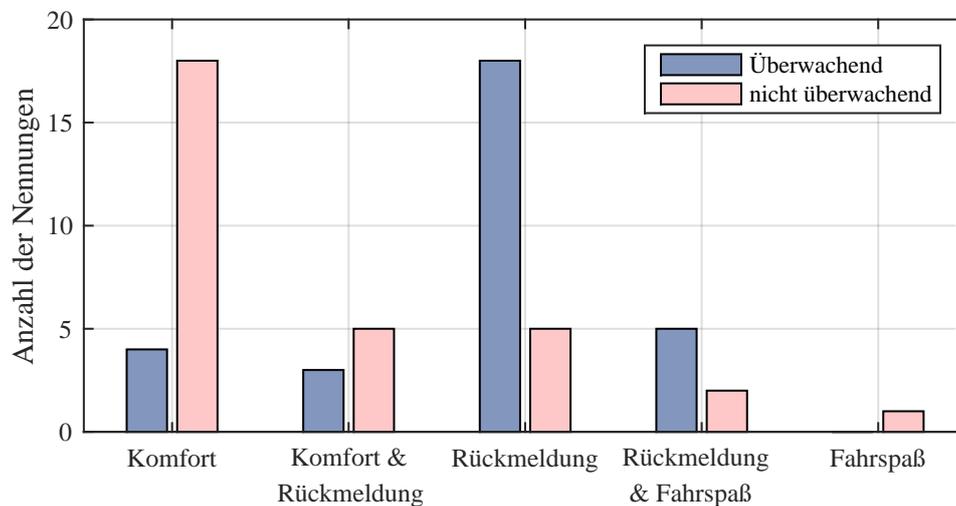


Abbildung 5.4: Ergebnisse des Fragebogens zur Akzeptanz spürbarer Fahrzeugbewegungen beim automatisierten Fahren

Im Falle des überwachenden Fahrers wünschen sich 26 von 30 ausgewerteten Probanden (87 %) beim teilautomatisierten Fahren eine gewisse Dynamik als Rückmeldung vom Fahrzeug. Im nicht überwachenden Fall reduziert sich die Anzahl auf 13 von 31 Probanden (42 %). Hier dominiert das Komfortbedürfnis.

5.3.2 Fahrversuch

Für die Auswertung des Fahrversuchs wird für jeden Probanden das arithmetische Mittel \bar{t}_{fsw} aus den beiden durchgeführten Messungen gebildet. In 66 % der Fälle liegen die zwei Messungen maximal eine Dynamikstufe ($\Delta t_{fsw} = 0,4 s$) auseinander. Die größte Abweichung von fünf Stufen tritt in lediglich 2 von 128 Fällen auf. Darüber hinaus zeigt die Verteilung der Differenzen zwischen erster und zweiter Messung keine signifikante Abweichung von einer Normalverteilung mit $\mu = 0$ ($t(127) = -0,150$; $p = 0,881$). Die Ergebnisse sind im Boxplot in Abbildung 5.5 und Tabelle 5.3 dargestellt. Auf der unteren x-Achse von Abbildung 5.5 ist die gemittelte Fahrstreifenwechselzeit aufgetragen, auf der oberen x-Achse ist die entsprechende maximale Querschleunigung aufgezeichnet (vgl. Abbildung 5.3), die sich unter Anwendung des beschriebenen Bahnplanungsansatzes aus Gleichung 4.2 errechnet.

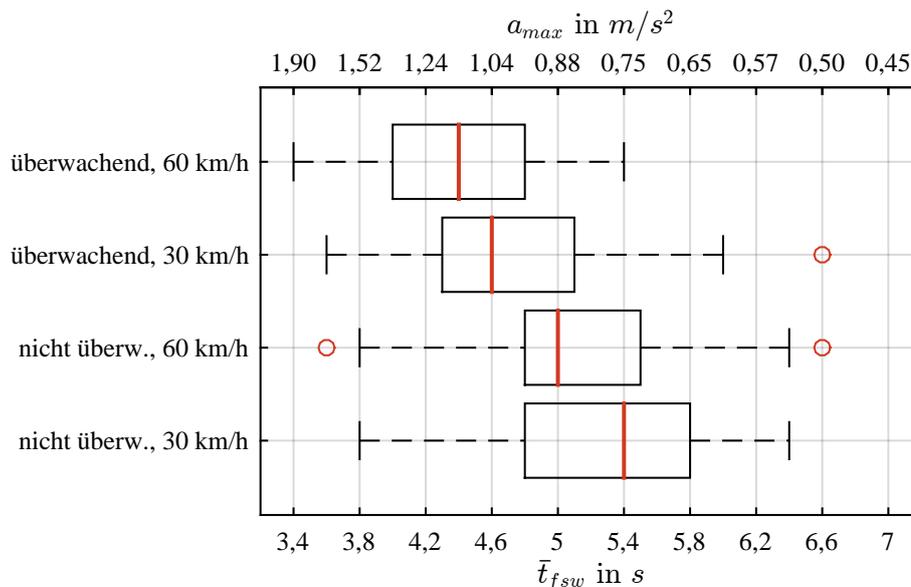


Abbildung 5.5: Verteilung der gewählten Fahrstreifenwechselzeiten im Fahrversuch

Über alle Faktoren hinweg bewegen sich die Mediane der akzeptierten Fahrstreifenwechselzeiten in einem Bereich 4,4 bis 5,4 s. Dies entspricht einer Querschleunigung von 0,75 bis 1,13 m/s^2 . Werte für weitere Dynamikgrößen können Abbildung 5.3 entnommen werden. Es sind zwei Zusammenhänge in den Plots zu erkennen. Einerseits ist die akzeptierte Dynamik im Falle des überwachenden Fahrers im Mittel höher als für den nicht überwachenden Fahrer. Andererseits akzeptieren die Probanden bei 30 km/h im Mittel eine höhere Fahrstreifenwechselzeit als bei 60 km/h .

Zur Prüfung der eingangs definierten Hypothesen wird eine zweifaktorielle Varianzanalyse (Messwiederholung auf beiden Faktoren) durchgeführt. Es besteht sowohl ein signifikanter Einfluss des Faktors *Fahrgeschwindigkeit* ($F(1,31) = 14,515, p < 0,01, r = 0,56$), als auch des Faktors *Rolle des Fahrers* ($F(1,31) = 35,596, p < 0,01, r = 0,73$) auf die akzeptierte Fahrstreifenwechselzeit. Eine signifikante Interaktion der beiden Faktoren ist nicht zu beobachten ($F(1,31) = 2,890, p = 0,10, r = 0,29$). Beide eingangs genannten Hypothesen können daher angenommen werden. Des Weiteren werden folgende Aussagen getroffen:

Aussage 1: Wenn der Fahrer die Fahraufgabe noch überwachen muss, akzeptiert er eine höhere Querdynamik beim Fahrstreifenwechsel, als wenn er keine Überwachungsaufgabe mehr inne hat.

Aussage 2: Die akzeptierte minimale Fahrstreifenwechselzeit ist bei 30 km/h höher als bei 60 km/h Fahrgeschwindigkeit.

Tabelle 5.3: Mittelwert, Median und Wertebereich der gewählten Fahrstreifenwechselzeiten im Fahrversuch

	<i>M</i>	<i>Mdn</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
überwachend 60 <i>km/h</i>	4,43 <i>s</i>	4,40 <i>s</i>	3,40 <i>s</i>	5,40 <i>s</i>
überwachend 30 <i>km/h</i>	4,74 <i>s</i>	4,60 <i>s</i>	3,60 <i>s</i>	6,60 <i>s</i>
nicht überw. 60 <i>km/h</i>	5,14 <i>s</i>	5,00 <i>s</i>	3,60 <i>s</i>	6,60 <i>s</i>
nicht überw. 30 <i>km/h</i>	5,31 <i>s</i>	5,40 <i>s</i>	3,80 <i>s</i>	6,40 <i>s</i>

5.3.3 Kommentare

Während des gesamten Fahrversuchs sind die Probanden aufgefordert dem Versuchsleiter zur Dokumentation ihre Gedanken und Einschätzungen zum erlebten Fahrverhalten mitzuteilen. Viele der getätigten Aussagen unterstützen die Ergebnisse des Fragebogens. So betont ein Großteil der Probanden, dass sie in der Überwacherrolle mehr Dynamik akzeptieren würden, als wenn sie die Fahraufgabe nicht mehr beobachten müssen und sich einer fahrfremden Tätigkeit widmen. Des Weiteren betonen viele Teilnehmer, dass die von ihnen akzeptierte Dynamik situationsabhängig sei. Dies betrifft sowohl das durchgeführte Fahrmanöver und das vorliegende Umfeld, als auch die Fahrzeit. In dichtem Verkehr sowie bei kurzen Fahrten können sich die Probanden mehr Dynamik vorstellen als bei geringer Verkehrsdichte oder Langstreckenfahrten über mehrere Stunden. Außerdem wünschen sich mehrere Probanden für zukünftig verfügbare Automationssysteme eine Möglichkeit, die Dynamik des Fahrverhaltens der Automation einstellen zu können.

Eine Anmerkung, welche die Mehrheit der Probanden zurückmeldet, ist, dass das Zurücklenken in den Zielfahrstreifen im Vergleich zum Auslenken aus dem Startfahrstreifen zu dynamisch erfolgt. Die Analysen menschlicher Fahrstreifenwechselmanöver in Sporrer et al. (1998), Salvucci und Liu (2002) sowie Freyer (2008) zeigen, dass diese üblicherweise einen asymmetrischen Querbeschleunigungsverlauf aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 diskutiert, generiert der in dieser Studie genutzte (vgl. Abbildung 4.7), wie auch die meisten Bahnplanungsansätze aus der Literatur, symmetrische Bahnen. Gemäß den Aussagen der Probanden in dieser Studie besteht auch bei automatisiert ausgeführten Fahrstreifenwechselmanövern der Wunsch nach einem asymmetrischen Querbeschleunigungsverlauf.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die präsentierten Ergebnisse belegen, dass die Probanden gegenüber einer spürbaren Fahrzeugbewegung beim automatisierten Fahren positiv eingestellt sind. Die Resultate des Fahrversuchs zeigen exemplarisch für das Manöver Fahrstreifenwechsel, dass die akzeptierten Querschleunigungen in einem Bereich liegen, der deutlich über den in Abschnitt 2.4.3 genannten Wahrnehmungsschwellen liegt. Dies bietet Spielraum für die Nutzung von spürbaren Fahrzeugbewegungen zur Rückmeldung des Systemzustandes innerhalb der akzeptierten Dynamikgrenzen des Fahrers. Die Streubreite der Messungen in Abbildung 5.5 verdeutlicht allerdings auch, dass es große interindividuelle Unterschiede in der akzeptierten Dynamik gibt. Dies unterstreicht den bereits in den Kommentaren geäußerten Wunsch nach einer parametrierbaren Dynamik der automatisierten Fahrzeugbewegung. Der intraindividuelle Unterschied zwischen zwei Messungen eines Probanden liegt in zwei Drittel der Fälle bei null oder einer Dynamikstufe (vgl. Abschnitt 5.3.2). Letzteres ist womöglich dadurch zu erklären, dass die von den Probanden akzeptierte Querdynamik in diesem Fall zwischen den beiden verfügbaren Dynamikstufen liegt. Hier sollte in zukünftigen Untersuchungen gegebenenfalls eine feinere Auflösung um den zu erwartenden Zielbereich herum gewählt werden.

Interessant ist, dass die ermittelten Werte keineswegs geringer sind als die in Tabelle 2.6 dargestellten Querdynamiken aus der Literatur (vgl. Schimmelpfennig & Nackenhorst, 1985; Freyer, 2008). Dies lässt den Schluss zu, dass Fahrer vor allem in der Teilautomatation ein ähnlich dynamisches Fahrstreifenwechselverhalten akzeptieren wie auch menschliche Fahrer üblicherweise an den Tag legen. Die von Freyer (2008) und Fastenmeier et al. (2001) beschriebene Unabhängigkeit der Fahrstreifenwechselzeit von der Geschwindigkeit gilt gemäß den Ergebnissen dieser Studie nicht für die automatisierte Fahrt. Dies ist entweder dadurch zu erklären, dass in den beiden genannten Quellen nur übliche Autobahngeschwindigkeiten von $> 100 \text{ km/h}$ betrachtet werden, könnte aber auch ein für die automatisierte Fahrzeugführung spezifischer Zusammenhang sein.

In der beschriebenen Studie wird der abstrakte Begriff „Querdynamik“ als Synonym für die Fahrstreifenwechselzeit verwendet. Wie bereits eingangs erwähnt, beeinflusst die Fahrstreifenwechselzeit diverse Dynamikgrößen wie Querschleunigung und Gierrate (vgl. Abbildung 5.3). All diese Größen haben potentiell einen Einfluss auf die Wahrnehmung dessen, was der Proband unter Querdynamik versteht und was er als akzeptabel empfindet. Welche Sinneseindrücke zu welchem Anteil Einfluss auf das Komfort- bzw. Diskomfortempfinden des Probanden haben, kann durch diese Studie nicht beantwortet werden. Um dies zu verdeutlichen, kann der bereits angesprochene Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die akzeptierte Fahrstreifenwechselzeit herangezogen werden.

So könnte die Fahrgeschwindigkeit einerseits einen direkten Einfluss auf die Dynamikwahrnehmung des Fahrers haben. Andererseits ist es ebenso denkbar, dass die mit sinkender Fahrgeschwindigkeit steigende Gierrate und Gierbeschleunigung bei gleichbleibender Querbeschleunigung zu dem beobachteten Effekt führt. Hier besteht Forschungsbedarf für weitere Studien zur Analyse der Einflüsse einzelner Sinnesreize auf die menschliche Empfindung von Komfort bzw. Diskomfort. Aufgrund der Tatsache, dass gemäß Abbildung 5.3 die meisten der vom Fahrer wahrnehmbaren Dynamikgrößen exponentiell mit der Fahrstreifenwechselzeit ansteigen, ist für zukünftige Experimente eine Diskretisierung der wählbaren Dynamikstufen anhand einer dieser Größen, wie z.B. der Beschleunigung zu bevorzugen.

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtpopulation an Autofahrern sowie auf alltägliche Fahrten im realen Verkehr seien folgende Grenzen des Versuches zu beachten: Es handelt sich um ein junges Probandenkollektiv mit hoher Fahrerfahrung. Bei älteren oder weniger geübten Fahrern könnten sich die Ergebnisse hin zu einer niedrigeren Dynamik verändern. Darüber hinaus betrachtet der Fahrversuch ein sehr einfaches Szenario. Die Aussagen der Probanden legen nahe, dass die Komplexität der Verkehrssituation einen Einfluss auf die Akzeptanz der Fahrzeugbewegung hat. Ein weiterer Einflussfaktor ist vermutlich die Dauer der automatisierten Fahrt. So könnte die akzeptierte Dynamik einerseits nach längerer Fahrt durch Gewöhnungseffekte steigen. Andererseits ist es denkbar, dass ein dynamisches Fahrverhalten, das während des kurzen Fahrversuchs noch akzeptiert wurde, nach einer längeren Fahrt als störend empfunden wird. Die Kommentare der Probanden während des Fahrversuchs stützen diese Annahme. Beim Versuchsdesign zur Variation der Rolle des Fahrers ist zu beachten, dass sich durch die Positionierung des Probanden auf dem Rücksitz (ca. 1 m hinter dem Fahrersitz) auch geringfügig unterschiedliche Verläufe in der auf den Fahrer wirkenden Querbeschleunigung ergeben. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}$, welche beim Fahrstreifenwechsel um die z-Achse des Fahrzeugs wirkt, je nach Hebel r zum wahrnehmenden Probanden auf diesen als zusätzliche Querbeschleunigung ($a_{y,\ddot{\psi}} = \ddot{\psi} \cdot r$) einwirkt. Da die Gierbeschleunigung des Fahrzeugs, analog zum Querruck, zum Zeitpunkt der maximalen Querbeschleunigung gleich Null ist (vgl. Abbildung 4.7), hat sie nahezu keinen Einfluss auf die maximal wirkende Querbeschleunigung. Der genaue Verlauf der auf den Fahrer wirkenden Beschleunigung wird sich aber in kleinen Grenzen zwischen den beiden Sitzpositionen unterscheiden. Dieser Einfluss wurde im Rahmen der Studie jedoch vernachlässigt.

Die im Versuch angewandte Methode der Herstellung hat sich für die Ermittlung von Akzeptanzschwellen als gut geeignet erwiesen. Sie bietet im Vergleich zu einer Bewertungsmethode wie sie beispielsweise bei Festner et al. (2016) und Scherer et al. (2016) angewandt wird, den Vorteil, dass sie die für einen gewünschten subjektiven Eindruck

notwendige Parametrierung direkt als Ergebnis liefert. Für mehrdimensionale Fragestellungen (z.B. Fahrstreifenwechselzeit in Kombination mit Längsbeschleunigung), ist jedoch denkbar, dass der Proband schnell überfordert ist, vor allem wenn eine Interaktion zwischen den beiden einzustellenden Größen vorliegt.

Für die im nächsten Kapitel beschriebene Evaluierung der Bewegungsrückmeldung sind die folgenden Erkenntnisse aus dieser Studie von Bedeutung:

- Spürbare Fahrzeugbewegungen werden vom Fahrer eines teilautomatisierten Systems nicht nur akzeptiert, sondern sind sogar erwünscht.
- Die maximale Querschleunigung beim Fahrstreifenwechsel sollte für das Autobahnszenario einen Wert von ca. $1,0 \text{ m/s}^2$ nicht überschreiten.
- Fahrer wünschen sich eine asymmetrische Ausführung des Fahrstreifenwechselmanövers in der automatisierten Fahrt.

6 Evaluierung der Bewegungsrückmeldung (Studie 2)

In den folgenden Abschnitten werden die in Kapitel 3 erläuterten Konzepte zur Rückmeldung von Zustand und Absicht der Automation in das in Kapitel 4 beschriebene Automationssystem integriert. Aufgrund der geschilderten Herausforderungen bei der Rückmeldung eines Fahrstreifenwechsels sowie der großen Bedeutung dieses Manövers für die Autobahnfahrt liegt der Fokus der folgenden Evaluierung, wie in der vorhergehenden Studie, auf dem Fahrstreifenwechselmanöver. Für die Gestaltung des Bewegungsverhaltens der Automation werden Erkenntnisse aus der Literatur (Abschnitt 2.4 und 2.5) sowie die Ergebnisse und Erfahrungen aus der ersten Studie berücksichtigt.

Zur Bewertung der Wirksamkeit des erarbeiteten Gestaltungskonzepts wird eine Probandenstudie mit einem Versuchsfahrzeug im realen Straßenverkehr durchgeführt. In der Studie wird untersucht, ob sich durch die gezielte Gestaltung der Fahrzeugbewegung des Fahrstreifenwechselmanövers die Vorhersehbarkeit des Manövers für den Fahrer verbessert. Außerdem erfolgt eine Analyse des Blickverhaltens des Fahrers, um zu untersuchen, ob sich die Aufmerksamkeit des Fahrers durch eine Bewegungsrückmeldung lenken lässt. Tabelle 6.1 fasst die wesentlichen Aspekte der Studie zusammen.

6.1 Versuchsszenario

Im beschriebenen Fahrversuch erleben die Probanden ein teilautomatisiertes Automationssystem, welches auf der Autobahn die Längs- und Querführung des Fahrzeugs übernimmt und selbständig Fahrstreifenwechselmanöver durchführt (vgl. Abschnitt 4.1). Um die Anzahl der Einflussfaktoren für die Studie in einem beherrschbaren Rahmen zu halten, wird der Fokus auf ein einzelnes Verkehrsszenario gelegt. Dieses ist der Fahrstreifenwechsel nach links aus der Fahrgasse hinter einem langsameren Vorderfahrzeug heraus. Das Szenario ist in Abbildung 6.1 grafisch dargestellt. Charakteristisch für das Szenario ist eine Querbewegung um eine Fahrstreifenbreite sowie eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, um an dem langsameren Fahrzeug vorbeizufahren.

Tabelle 6.1: Studienübersicht: Bewegungsrückmeldung beim automatisierten Fahren

Forschungsfragen	<p>1. Kann die Vorhersehbarkeit von Manövern des Automationssystems durch die gezielte Gestaltung der Fahrzeugbewegung verbessert werden?</p> <p>2. Kann die Aufmerksamkeit des Fahrers durch die gezielte Gestaltung der Fahrzeugbewegung gelenkt werden?</p>
Ziel	Bewertung der Wirksamkeit des entwickelten Gestaltungskonzepts
Methodik	Realfahrversuch, Fragebogen und Fahrerbeobachtung
Fokus	Fahrstreifenwechselmanöver auf der Autobahn
Unabh. Variable	Ausprägung des Bewegungsverhaltens beim Fahrstreifenwechselmanöver
Abh. Variablen	Manövererkennungszeit, Vorhersehbarkeit und Blickverhalten

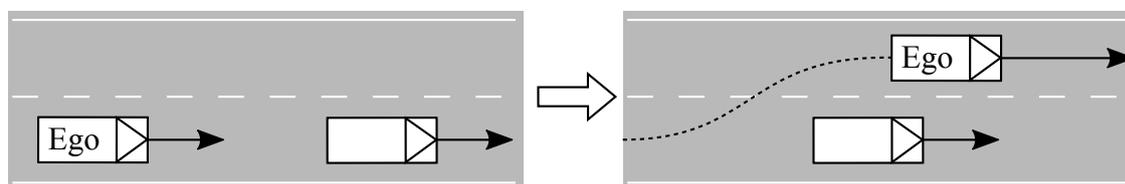


Abbildung 6.1: Versuchsszenario „Fahrstreifenwechsel nach links aus der Folgefahrt“

6.2 Gestaltung des Fahrstreifenwechselmanövers

Das Fahrstreifenwechselmanöver nach links ist durch die Querbewegung von einem Startfahrstreifen in den linken Nachbarfahrstreifen charakterisiert. Dafür ist gemäß den Ausführungen aus Kapitel 3 (Abbildung 3.4) für das Auslenken aus dem Startfahrstreifen zunächst eine Querbeschleunigung nach links und anschließend für das Einlenken in den Zielfahrstreifen eine Querbeschleunigung nach rechts notwendig. Abbildung 4.7 stellte diesen Querbeschleunigungsverlauf bereits exemplarisch dar. Die Fahrzeugbewegung in Längsrichtung kann nicht allgemeingültig für alle Fahrstreifenwechselmanöver definiert werden. Sie hängt von der speziellen Verkehrssituation ab. Es sind Fahrstreifenwechselmanöver möglich, die völlig ohne Längsbeschleunigung auskommen, da mit konstanter Fahrgeschwindigkeit gewechselt wird. Darüber hinaus existieren Wechselsituationen, die eine Anpassung von Geschwindigkeit und Position an eine Lücke auf dem Zielfahrstreifen notwendig machen. Auf der Autobahn dient ein Fahrstreifenwechsel nach links meist dem Ziel, ein langsamerer Vorderfahrzeug zu überholen und schneller zu fahren. In diesem Fall geht mit dem Fahrstreifenwechsel im Allgemeinen eine Geschwindigkeitserhöhung einher.

6.2.1 Querbewegung

Die charakteristischen Eigenschaften des in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen quintischen Polynoms bedingt eine symmetrische Form der Fahrstreifenwechselbahn. Symmetrisch bedeutet in diesem Fall, dass der Querbeschleunigungsverlauf für das Aus- und Zurücklenken identisch ist. Gemäß den Ergebnissen aus der im vorherigen Kapitel beschriebenen Studie zur akzeptierten Fahrdynamik wird diese Symmetrie als unnatürlich empfunden. Stattdessen wünschen sich die Probanden ein, im Vergleich zum Auslenken aus dem Startfahrstreifen, sanfteres Zurücklenken in den Zielfahrstreifen. Um diesem Bedürfnis Rechnung zu tragen, werden in Heil, Lange und Cramer (2016) Methoden zur Generierung asymmetrischer Fahrstreifenwechselbahnen entwickelt. Dafür kommt eine Kombination zweier quintischer Polynome zum Einsatz. Zunächst dient ein Polynom dem Aufbau einer gewünschten maximalen Querbeschleunigung unter Einhaltung eines definierten maximalen Rucks. Anschließend wird das Fahrzeug durch ein zweites, angehängtes Polynom mit einem wählbaren Asymmetriefaktor wieder parallel zum Zielfahrstreifen ausgerichtet. Die in Tabelle 4.1 definierten Parameter der Bahnplanung werden dementsprechend gemäß Tabelle 6.2 erweitert.

Damit die Wahrnehmbarkeit der Querbewegung beim Fahrstreifenwechsel gemäß Anforderung A1 (Kapitel 3) gegeben ist, sollte $a_{y,max}$ über der Wahrnehmungsschwelle

Tabelle 6.2: Erweiterte Parameter zur Anpassung des Querführungsverhaltens der Bahnplanung

Parameter	Erklärung
d_{ziel}	Lateraler Zielabstand des Fahrzeugs zum Referenzpfad
$a_{y,max}$	Max. Querbeschleunigung für das Erreichen des lateralen Zielabstands
$\dot{j}_{y,max}$	Max. Querruck für das Erreichen des lateralen Zielabstands
f_{asym}	Asymmetriefaktor der Querbewegung (Wertebereich von 0-1)

des Menschen liegen und gleichzeitig ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand gegeben sein. Um sicherzustellen, dass der Fahrer die Beschleunigung wahrnimmt, wird als untere Grenze die 100 % Schwelle nach Müller (2015) in Höhe von $0,4 m/s^2$ angenommen. In Hinblick auf den Signal-Rausch-Abstand werden die im Stillstand (bei laufendem Motor) sowie während der Fahrt auf gerader Strecke wirkenden Längs- und Querbeschleunigungen analysiert. Abbildung 6.2 stellt die mittels der im Versuchsfahrzeug verbauten Inertialplattform (iMAR, 2012) gemessenen Beschleunigungen für einen Zeitraum von 30 s dar. Die in blau dargestellte Messung wurde bei einer Fahrgeschwindigkeit von $120 km/h$ auf einem geraden Autobahnabschnitt mit automatisierter Querführung durchgeführt. Die Standardabweichung der Querbeschleunigung liegt bei $0,32 m/s^2$. In Anbetracht dieses Wertes wird eine Querbeschleunigung von $a_{y,max} > 0,5 m/s^2$ für die sichere Rückmeldung der Querbewegung an den Fahrer gefordert.

Neben der Wahrnehmbarkeit muss auch die Akzeptanz der Querbewegung sichergestellt sein. Dazu werden die in Studie 1 (Kapitel 5) ermittelten Akzeptanzschwellen zu Rate gezogen. Da keine Messwerte für typische Autobahngeschwindigkeiten vorliegen, werden die Ergebnisse für einen überwachenden Fahrer bei $60 km/h$ angewendet. Der Vergleich mit den menschlichen Fahrstreifenwechseldynamiken aus Tabelle 2.6 rechtfertigt diese Annahme. Als obere Grenze für $a_{y,max}$ wird das dritte Quartil der Ergebnisse aus Studie 1 bei $0,95 m/s^2$ Querbeschleunigung gewählt. Für die Parametrierung der Querbeschleunigung ergibt sich damit ein Zielbereich von $0,5 m/s^2 < a_{y,max} < 0,9 m/s^2$.

Für die Parametrierung des Rucks sollte gemäß Anforderung A3 (Kapitel 3) die Unterscheidbarkeit von üblicherweise beim Folgen eines Fahrstreifens auftretenden Rucken gegeben sein. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2008) legt auf Autobahnen für den Übergangsbogen von Geraden in Kurven einen minimalen Klothoidenparameter $A = 240 m$ fest. Damit berechnet sich der Kurvenradius R über die Bogenlänge L zu $R = A^2/L$. Mit einer Querbeschleunigung $a_y = v^2/R$ und

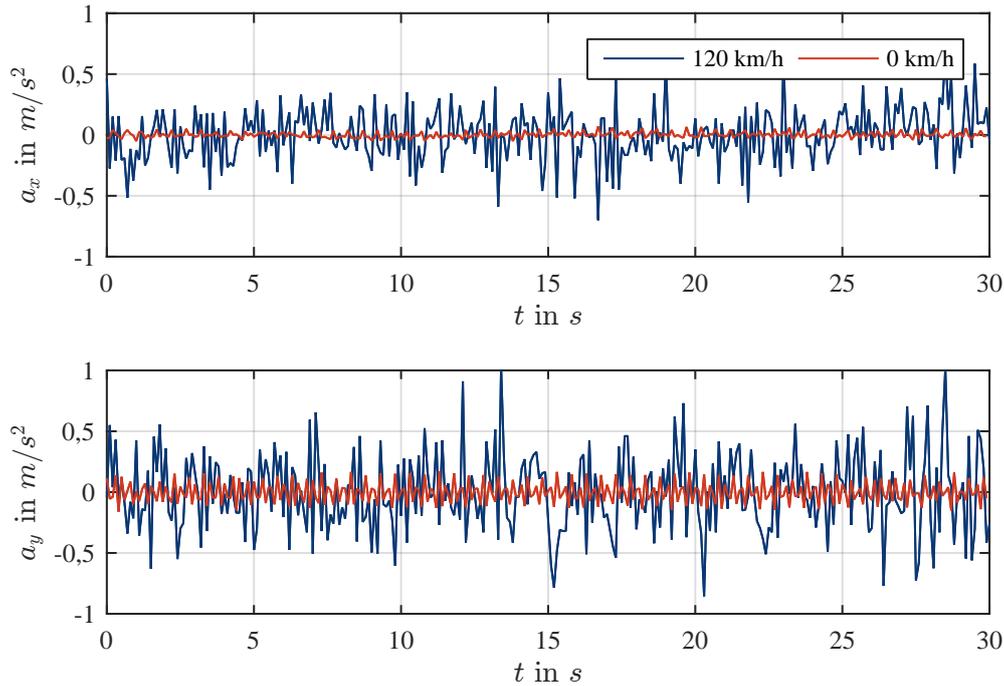


Abbildung 6.2: Gemessene Beschleunigungen im Stillstand und bei automatisierter Geradeausfahrt mit 120 km/h

$L = v \cdot t$ resultiert für den Ruck $j_y = \dot{a}_y = v^3/A^2$. Damit ergibt sich bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 120 \text{ km/h}$ ein maximaler Ruck beim Einfahren in eine Kurve von $0,64 \text{ m/s}^3$. Für die Differenzierbarkeit von Fahrstreifenwechsel und Kurveneinfahrt wird daher $j_{y,max} > 0,7 \text{ m/s}^3$ gefordert.

In Kapitel 3 wurde bereits erläutert (vgl. Abbildung 3.8), dass die Einhaltung der genannten Zielbereiche für die Querbeschleunigung zwar die Wahrnehmbarkeit sowie die Akzeptanz der Querbewegung sicherstellt, dem Fahrer jedoch nur sehr wenig Zeit zwischen der Wahrnehmung eines Manövers und einer gegebenenfalls erforderlichen Reaktion bleibt. Für eine rechtzeitige Rückmeldung gemäß Anforderung A5 (Kapitel 3) wird daher im Folgenden ein zusätzliches Bewegungselement in die Vorbereitungsphase des Manövers (vgl. Abbildung 4.4) eingebaut. Dadurch lässt sich eine zeitlich vorgezogene Rückmeldung an den Fahrer bereits vor dem eigentlichen Auslenken aus dem Fahrstreifen realisieren. Als vorgezogene Bewegung wird der Aufbau eines Querversatzes innerhalb des Startfahrstreifens hin zum Zielfahrstreifen gewählt. Dies entspricht einem Querbeschleunigungsverlauf wie bei einem Fahrstreifenwechsel, der das Fahrzeug jedoch nicht um eine Fahrstreifenbreite, sondern lediglich um einige Zentimeter seitlich versetzt. Der Zeitpunkt dieser vorgezogenen Bewegung kann prinzipiell frei gewählt werden.

6.2.2 Längsbewegung

Die Längsbewegung ist beim Fahrstreifenwechsel, wie bereits erwähnt, stark von der spezifischen Fahrsituation abhängig. Für das im Rahmen der Studie betrachtete Fahrstreifenwechselmanöver aus der Folgefahrt heraus, geht mit dem Wechsel auch immer eine Geschwindigkeitserhöhung einher. Die Längsbeschleunigung für die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit kann analog zur Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel für die Rückmeldung des Manövers an den Fahrer genutzt werden. Für die Parametrierung der Beschleunigung wird ebenfalls die 100 % Wahrnehmungsschwelle nach Müller (2015) angewandt. Die Standardabweichung der gemessenen Längsbeschleunigung bei gleichmäßiger Geradeausfahrt (vgl. Abbildung 6.2) liegt bei $0,22 \text{ m/s}^2$. Als Akzeptanzschwelle wird die maximale ACC-Beschleunigung gemäß ISO (2010) (vgl. Tabelle 2.7) gewählt. Auf Basis dieser Randbedingungen wird ein Zielbereich für die Längsbeschleunigung von $0,4 \text{ m/s}^2 < a_{x,max} < 2,0 \text{ m/s}^2$ gefordert.

Die Längsbeschleunigung ist zeitlich nicht fest an die Durchführungsphase des Fahrstreifenwechsels gebunden. Sie lässt sich in gewissen Grenzen variieren. So kann sie bereits vor dem Ausscheren aus dem Startfahrstreifen in Form einer Verringerung des Abstands zum Vordermann erfolgen oder im Extremfall erst nach vollständig abgeschlossener Querbewegung im Zielfahrstreifen beginnen. In Hinblick auf eine frühzeitige Rückmeldung an den Fahrer, wird in der folgenden Studie eine möglichst frühe Beschleunigung bereits im Startfahrstreifen angestrebt. Realisiert wird dies durch eine deutlich spürbare Verringerung der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug in der Vorbereitungsphase des Wechsels.

6.2.3 Gestaltungsvarianten

Zur Bewertung der Wirksamkeit der Bewegungsrückmeldung werden im Fahrversuch zwei Ausprägungen der Fahrzeugbewegung während des automatisierten Fahrstreifenwechsels miteinander verglichen. Beim Entwurf der beiden Ausprägungen liegt der Fokus auf den zuvor beschriebenen vorgezogenen Längs- und Querbewegungen während der Vorbereitungsphase des Manövers.

Standardausprägung In dieser Ausprägung ist die Vorbereitungsphase des Fahrstreifenwechsels für den Fahrer vestibulär nicht wahrnehmbar. Die Automation prüft den Verkehr auf dem Zielfahrstreifen auf eine passende Lücke, während das Fahrzeug dem Vordermann mit konstantem Abstand folgt. Eröffnet sich eine geeignete Lücke, so beginnt die Durchführungsphase mit einer simultanen Beschleunigung in Querrichtung

hin zum Zielfahrstreifen und einer Beschleunigung in Längsrichtung zur Erhöhung der Geschwindigkeit. Dieser Verlauf ist Beispielsweise auch in Salvucci und Liu (2002) für manuell gefahrene Fahrstreifenwechsel zu finden. Sowohl für die Bewegung in Längs- als auch in Querrichtung werden die Gestaltungsempfehlungen aus den Anforderungen A1-A3 angewendet. Die rechtzeitige Rückmeldung (A5) ist jedoch nicht gegeben.

Feedbackausprägung In dieser Ausprägung wird explizit die Vorbereitungsphase des Wechsels vestibulär spürbar gestaltet, um Anforderung A5 gerecht zu werden. Dazu kommen die im vorherigen Kapitel erläuterten Gestaltungselemente zum Einsatz. Identifiziert das Fahrzeug eine geeignete Lücke auf dem Zielfahrstreifen, so beginnt die Vorbereitungsphase des Manövers, welche der Fahrer durch eine Beschleunigung bzw. eine Verringerung der Zeitlücke zum Vorderfahrzeug sowie einen lateralen Querversatz in Richtung des Zielfahrstreifens vestibulär wahrnehmen kann. Die beiden vorgezogenen Fahrzeugbewegungen sollen dem Fahrer den bevorstehenden Fahrstreifenwechsel frühzeitig ankündigen, bevor das Fahrzeug in der darauffolgenden Durchführungsphase mit der vollständigen Querbewegung auf den Zielfahrstreifen beginnt.

Abbildung 6.3 stellt die resultierenden Beschleunigungsverläufe in Längs- und Querrichtung sowie die entsprechenden Bewegungselemente für die beiden Ausprägungen schematisch dar. Gemäß den, im vorherigen Abschnitt beschriebenen Zielbereichen für Längs- und Querschleunigung werden die in Tabelle 6.3 aufgelisteten Parameter für die beiden Ausprägungen gewählt. Die exakten Werte der Parameter sind das Resultat mehrerer Vorversuche.

Für die Querführung ist eine direkte Einstellung der gewünschten Beschleunigung und des Rucks im Bahnplanungsmodul möglich. Für den vorbereitenden Querversatz in der Feedbackausprägung wird eine geringere Querschleunigung als für den letztendlichen Wechsel auf den Zielfahrstreifen gewählt. Da in der Feedbackausprägung bereits ein Teil der Querbewegung zum Zielfahrstreifen in der Vorbereitungsphase geschieht, unterscheidet sich das Beschleunigungsprofil in der Durchführungsphase von dem in der Standardausprägung. Für die Parametrierung des Längsführungsmodells müssen die gewünschten Dynamikgrößen indirekt durch entsprechende Wahl der in Tabelle 4.2 beschriebenen Parameter eingestellt werden. Dabei dient die Grundapplikation des Audi Serien-ACCs als Ausgangspunkt. Die aus der Parametrierung resultierenden Längsbeschleunigungen sind von mehreren Faktoren, wie z.B. der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Vorderfahrzeuges sowie der eigenen Zielgeschwindigkeit abhängig. Im Fahrversuch ergeben sich daraus je nach Verkehrssituation leicht unterschiedliche Beschleunigungsprofile. Diese halten sich jedoch stets im geforderten Zielkorridor von $0,4 \text{ m/s}^2 < a_{x,max} < 2,0 \text{ m/s}^2$ auf.

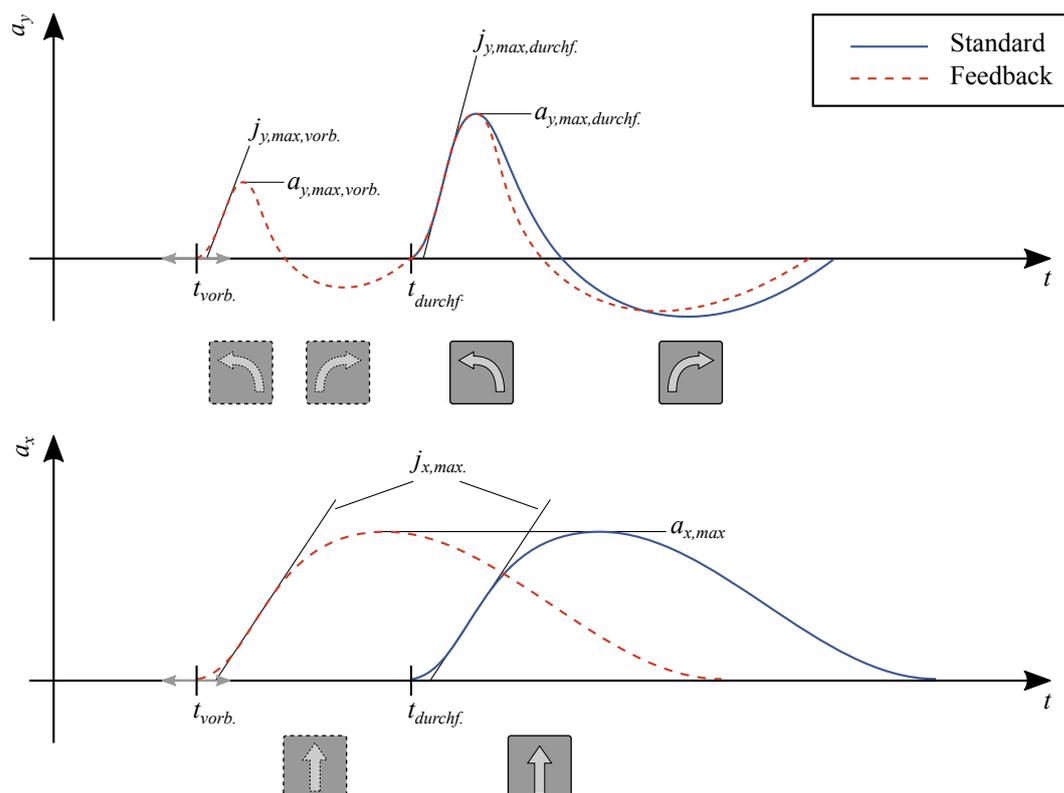


Abbildung 6.3: Schematischer Entwurf der Längs- und Querbeschleunigungsprofile des Fahrstreifenwechselmanövers

Die zeitliche Anordnung der Manöverphasen, welche durch $t_{vorb.}$ und $t_{durchf.}$ beschrieben ist, wird gemäß Abbildung 4.11 durch den Wizard bestimmt. Der Wizard versucht, so weit möglich, die Vorbereitungsphase mindestens 2 s vor der Durchführungsphase beginnen zu lassen. Je nach Verkehrssituation auf dem Zielfahrstreifen kann der exakte Zeitpunkt jedoch variieren.

6.3 Fragestellung und Hypothesengenerierung

Um die eingangs in Tabelle 6.1 aufgeführten Fragen zu beantworten, werden daraus Hypothesen abgeleitet. Die allgemein auf ein automatisiert fahrendes Fahrzeug bezogene Fragestellung wird zunächst auf den genannten Untersuchungsfokus (Fahrstreifenwechsel nach links aus der Folgefahrt) konkretisiert.

Tabelle 6.3: Gewählte Parameter für die Längs- und Querbewegung beim Fahrstreifenwechsel in den beiden Gestaltungsvarianten

		Standardausprägung	Feedbackausprägung
Zielgeschwindigkeit	v_{ziel}	120 km/h	
Vorbereitung:			
Querversatz	d_y	0 m	0,2 m
Querbeschl.	$a_{y,max,vorb.}$	0 m/s ²	0,5 m/s ²
Querruck	$\dot{j}_{y,max,vorb.}$	0 m/s ³	0,5 m/s ³
Längsbeschl.	$a_{x,max}$	0 m/s ²	≈ 1,0 m/s ²
Längsruck	$\dot{j}_{x,max}$	0 m/s ³	≈ 0,5 m/s ³
Zeitlücke	$\tau_{x,ziel}$	2,5 s	1,2 s
Durchführung:			
Querversatz	d_y	Fahrstreifenbreite ≈ 3,75 m	
Querbeschl.	$a_{y,max,durchf.}$	0,75 m/s ²	
Querruck	$\dot{j}_{y,max,durchf.}$	1,0 m/s ³	
Asymm. Faktor	f_{asym}	0,5	
Längsbeschl.	$a_{x,max}$	≈ 1,0 m/s ²	
Längsruck.	$\dot{j}_{x,max}$	≈ 0,5 m/s ³	
Zeitlücke	$\tau_{x,ziel}$	2,5 s	

6.3.1 Vorhersehbarkeit von Fahrmanövern

Die „Vorhersehbarkeit von Manövern des Automationssystems“ reduziert sich im Folgenden auf die Vorhersehbarkeit von Fahrstreifenwechselmanövern. Es wird dementsprechend folgende Fragestellung formuliert:

Fragestellung 1: Wie beeinflusst die gewählte Funktionsausprägung die Vorhersehbarkeit von Fahrstreifenwechselmanövern?

Zur Beantwortung dieser Frage ist der Begriff „Vorhersehbarkeit“ zu operationalisieren. Dazu kommen zwei Methoden zum Einsatz. Für die Erste erhält der Proband einen Dauertaster. Er wird im Versuch angewiesen, diesen zu betätigen, wenn er der Meinung ist, dass das Fahrzeug ein Fahrstreifenwechselmanöver beginnt. Abbildung 6.4 stellt den zeitlichen Verlauf des Fahrstreifenwechselmanövers schematisch dar. Das Manöver

beginnt mit der Vorbereitungsphase. Deren Eintrittszeitpunkt $t_{vorb.}$ kann, wie bereits beschrieben, je nach Verkehrssituation und Verhalten des Wizards zeitlich variieren. Die Durchführungsphase beginnt zum Zeitpunkt $t_{durchf.}$ und endet zum Zeitpunkt $t_{abschl.}$. Der Zeitpunkt der Daumentasterbetätigung wird mit $t_{trigger}$ bezeichnet. Als Metrik für die Fahrstreifenwechselvorhersehbarkeit wird die Fahrstreifenwechselerkennungszeit $\Delta t_{erkenn.}$ definiert. Diese berechnet sich durch $\Delta t_{erkenn.} = t_{trigger} - t_{durchf.}$. Ein negativer Wert signalisiert, dass der Fahrstreifenwechsel bereits in der Vorbereitungsphase erkannt wurde.

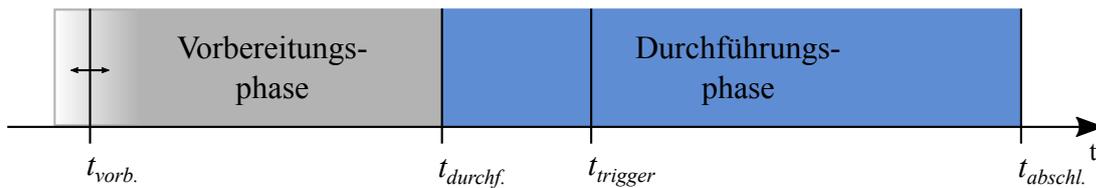


Abbildung 6.4: Zeitlicher Ablauf eines Fahrstreifenwechselmanövers ($t_{trigger}$ exemplarisch für eine Erkennung des Manövers in der Durchführungsphase)

Als weitere Metrik für die Vorhersehbarkeit dient ein Fragebogen. Der Proband soll die Frage beantworten, wie vorhersehbar er das Fahrstreifenwechselmanöver empfunden hat. Dazu kann er auf einer siebenstufigen Skala zwischen „vorhersehbar“ und „überraschend“ wählen (siehe Fragebogen in Anhang A.2).

Hypothese 1a: Die Fahrstreifenwechselerkennungszeit $\Delta t_{erkenn.}$ ist in der Feedbackausprägung kleiner als in der Standardausprägung.

Hypothese 1b: Die Vorhersehbarkeit des Fahrstreifenwechsels wird vom Fahrer in der Feedbackausprägung besser beurteilt als in der Standardausprägung.

6.3.2 Aufmerksamkeit

Zur Beantwortung der Frage, ob die Aufmerksamkeit des Fahrers durch Bewegungsrückmeldung gelenkt werden kann, wird das Blickverhalten des Fahrers während des Fahrstreifenwechselmanövers analysiert.

Fragestellung 2: Wie beeinflusst die gewählte Funktionsausprägung das Blickverhalten des Fahrers vor und während des Fahrstreifenwechselmanövers?

Zur Analyse des Blickverhaltens wird der Proband während des Versuches gefilmt. Das Videomaterial wird im Anschluss an die Studie per Hand gelabelt. Dazu wird der Sicht-

bereich des Fahrers, wie in Abbildung 6.5 dargestellt, in die folgenden sechs Areas of Interest (AOI) unterteilt: Vorne (1), Außenspiegel links (2), Innenspiegel (3), alle Blicke nach rechts (4), Schulterblick nach links (5) und sonstige Blicke (6). Für die Analyse des Blickverhaltens werden die Blickanteile aller Probanden in die entsprechenden AOI über die Zeit relativ zum Beginn der Durchführungsphase des Fahrstreifenwechsels verglichen. Als objektives Maß für die Aufmerksamkeitslenkung wird die durchschnittliche Anzahl der AOI-Wechsel n_{AOI} in einem Zeitintervall von $-3 s$ bis $0 s$ vor der Durchführungsphase betrachtet.

Hypothese 2: Die Anzahl der AOI-Wechsel n_{AOI} im Zeitintervall von $-3 s$ bis $0 s$ vor der Durchführungsphase ist in der Feedbackausprägung größer als in der Standardausprägung.



Abbildung 6.5: AOIs im Sichtbereich des Fahrers

6.3.3 Deskriptive Fragestellungen

Neben den beiden genannten Hauptfragestellungen werden weitere Fragestellungen betrachtet, die sich mit der Beurteilung des automatisierten Fahrverhaltens durch den Fahrer, seinem Vertrauen in die Automation sowie seiner mentalen Beanspruchung befassen.

Deskriptive Fragestellung 1: Wie beurteilen die Probanden das Fahrverhalten in den beiden Funktionsausprägungen?

Der Proband erhält die Aufgabe, den automatisierten Fahrstreifenwechsel nach links zu beurteilen. Beurteilungskriterien sind neben der bereits genannten Vorhersehbarkeit des Manövers, die Sinnhaftigkeit, der wahrgenommene Komfort sowie die Frage, wie

natürlich der Fahrstreifenwechsel empfunden wurde. Die Beurteilung erfolgt jeweils auf einer siebenstufigen Skala. Für die Items Vorhersehbarkeit und Natürlichkeit des Manövers hat der Proband außerdem die Möglichkeit, in einem Freitextfeld die Gründe für seine Beurteilung zu erläutern. In einer weiteren Frage wird im Detail auf die Dynamik der Fahrzeugbewegung eingegangen. Der Proband soll dafür den Ruck und die Querschleunigung beim Auslenken aus dem Fahrstreifen bewerten. Die entsprechenden Fragen sind in Anhang A.2 zu finden.

Deskriptive Fragestellung 2: Hat die Funktionsausprägung einen Einfluss auf das Vertrauen des Fahrers in das Automationssystem?

Das Vertrauen des Fahrers in das Automationssystem wird mittels des Fragebogens nach Jian, Bisantz und Drury (2000) gemessen. Die verwendete deutsche Übersetzung entspricht der von Gold, Körber, Hohenberger, Lechner und Bengler (2015). Der entsprechende Fragebogenteil ist in Anhang A.2 zu finden.

Deskriptive Fragestellung 3: Hat die Funktionsausprägung einen Einfluss auf die mentale Beanspruchung des Fahrers während der automatisierten Fahrt?

Zur Messung der mentalen Beanspruchung wird der Proband, immer wenn das Automationssystem aktiv ist, in regelmäßigen Abständen gefragt, wie er sich fühlt. Er wird angewiesen, seine Beanspruchung gemäß einer fünfstufigen Bewertungsskala (angelehnt an Schießl, 2009) anzugeben. Dazu ist Tabelle 6.4 gut sichtbar im Fahrzeug angebracht. Die Abfrage nach der aktuellen Beanspruchung erfolgt im zeitlichen Abstand von einer Minute.

Tabelle 6.4: Antwortmöglichkeiten zur Messung der mentalen Beanspruchung

sehr entspannt	entspannt	neutral	beansprucht	sehr beansprucht
-2	-1	0	1	2

6.4 Versuchsdesign

6.4.1 Probandenkollektiv

Automatisierte Fahrfunktionen befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstand. Es ist daher davon auszugehen, dass die Situation, in einem selbstfahrenden Fahrzeug mit bis zu 120 *km/h* auf der Autobahn zu fahren, ohne selbst motorisch in die Fahraufgabe involviert zu sein, für die meisten Probanden eine Erfahrung ist, die sie zuvor noch nicht gemacht haben. Die Probanden verhalten sich während der Versuchsfahrt vermutlich anders, als wenn sie bereits viel Erfahrung mit einem derartigen System gesammelt hätten und eine solche Fahrt zum Alltag gehört. Um den Einfluss dieses Erstkontakts so weit möglich abzuschwächen, werden Probanden ausgewählt, für die die Fahrsituation des Versuchs so vertraut wie möglich ist. Alle Probanden weisen daher eine hohe jährliche Fahrleistung auf und fahren regelmäßig auf der Autobahn. Sie haben größtenteils Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen, die aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen (siehe Abbildung 6.6). Insgesamt nehmen 20 Personen an der Studie teil. Um so gut wie möglich ein Kollektiv potentieller Kunden erster automatisiert fahrender Fahrzeuge abzubilden, werden nur bereits berufstätige Personen über 24 Jahren ausgewählt. Das Durchschnittsalter beträgt 33 Jahre, die jüngste Person ist 24, die älteste 64 Jahre alt. Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt 10000 - 20000 *km* pro Jahr. 15 Probanden sind männlich. Weitere Informationen zu Fahrstil und Einstellung der Probanden zum automatisierten Fahren sind in Anhang A.4 zu finden.

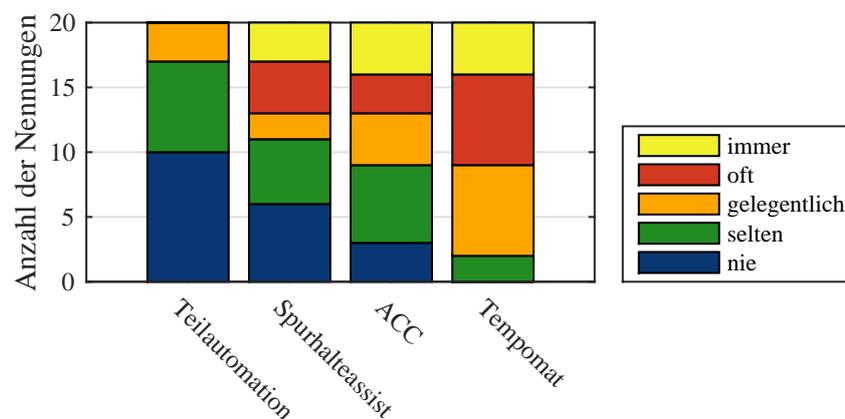


Abbildung 6.6: Erfahrung der Probanden mit Fahrerassistenz- und Automationssystemen („Wie oft haben Sie diese verwendet?“).

6.4.2 Versuchsaufbau

Für den Versuch wird das in Kapitel 4 beschriebene Automationssystem eingesetzt. Während des Versuchs befinden sich drei Personen im Fahrzeug: Der Proband auf dem Fahrersitz, der Wizard, welcher gleichzeitig Versuchsleiter ist, auf dem Beifahrersitz sowie eine dritte Person auf der Rückbank. Die dritte Person zeichnet den vom Probanden mitgeteilten Beanspruchungszustand auf und überwacht zusätzlich zum Wizard das Fahrverhalten sowie das Fahrzeugumfeld. Darüber hinaus markiert sie relevante Stellen in der Aufzeichnung, um diese bei Bedarf später in der Auswertung berücksichtigen zu können.

Versuchsfahrzeug

Abbildung 6.7 zeigt den Innenraum des genutzten Versuchsfahrzeugs. An der linken A-Säule des Fahrzeugs befindet sich die Fahrerbeobachtungskamera zur Erfassung der AOI des Probanden. Auf der Mittelkonsole liegt der Daumentaster zur Messung der Fahrstreifenwechselerkennungszeit. Auf dem Beifahrersitz ist der Controller zu sehen, der dem Wizard ermöglicht, die in Abbildung 4.11 dargestellten Transitionen freizugeben. Um eine bessere Sicht auf den rückwärtigen Verkehr zu erhalten, sind für den Wizard ein zusätzlicher Innenspiegel sowie zwei zusätzliche Außenspiegel (im Bild nicht dargestellt) montiert. Auf dem Armaturenbrett vor dem Beifahrersitz befindet sich ein Bildschirm und eine Tastatur zur Bedienung der PCs, die sich im Kofferraum des Fahrzeuges befinden.

Um die Einflüsse des Bedien- und Anzeigekonzepts so gering wie möglich zu halten, erhält der Fahrer im Kombiinstrument nur sehr wenig Information über den Zustand des Automationssystems. Diese umfasst lediglich die Zustände „System verfügbar“, „System aktiv“ und „Bitte übernehmen!“. Zudem wird dem Probanden bei einem Fahrstreifenwechsel kein visuelles oder akustisches Blinkersignal dargeboten, so dass dieser nur über die Fahrzeugbewegung Rückmeldung über den Manöverzustand erhält.

Versuchsstrecke

Der Fahrversuch wird auf der Autobahn A9 zwischen Ingolstadt und München durchgeführt. Dieser Autobahnabschnitt weist durchgängig drei Fahrstreifen pro Richtung auf. Der Fahrbahnverlauf ist über die gesamte Strecke entsprechend der Anforderung des prototypischen Systems hochgenau kartiert.



Abbildung 6.7: Innenraum des eingesetzten Versuchsfahrzeugs

Datenerfassung

Die Erfassung der Daten erfolgt über einen Logging-PC im Fahrzeug. Auf diesem läuft wie auf dem Funktions-PC das Softwareframework ADTF. Dieses zeichnet die folgenden Daten auf:

- Buskommunikation des Versuchsfahrzeugs inkl. Status des Automationssystems
- Videobild der nach vorne auf den Verkehr gerichteten Kamera des Fahrzeugs
- Videobild der Fahrerbeobachtungskamera
- Audiosignal des in die Fahrerbeobachtungskamera integrierten Mikrofons
- Signal des Daumentasters zur Messung der Erkennungszeit
- Vom Probanden mitgeteilte Beanspruchungswerte

6.4.3 Versuchsdurchführung

Bereits vor dem Fahrversuch füllen die Probanden einen demographischen Onlinefragebogen aus. Es wird das Umfragetool LimeSurvey genutzt. Auf Basis des demographischen Fragebogens erfolgt eine Auswahl von 20 Probanden entsprechend der genannten Anforderungen. Der Ablauf des Fahrversuchs ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Studie dauert ca. 110 Minuten und gliedert sich in vier Teile.

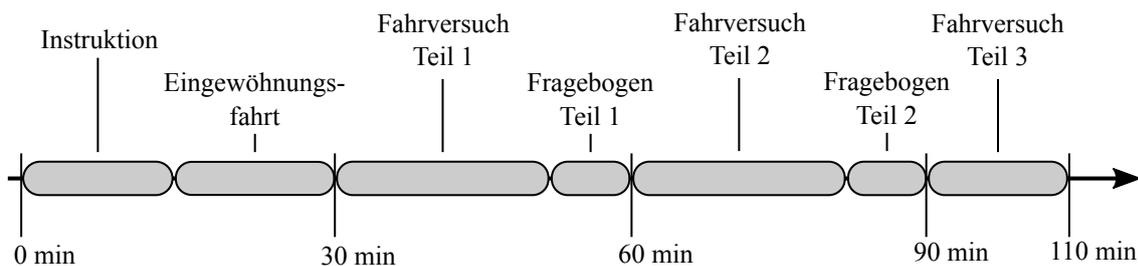


Abbildung 6.8: Zeitlicher Ablauf der Probandenstudie

Instruktion und Eingewöhnung

Der erste Teil enthält die Instruktion und Eingewöhnungsfahrt. Hier erhalten die Probanden das in Anhang A.1 abgedruckte Informationsblatt. Nach der Klärung von offenen Fragen sowie der Unterschrift einer Einverständniserklärung beginnt der Fahrversuch mit einer Eingewöhnungsfahrt. Dabei fährt der Proband zunächst mit deaktiviertem Automationssystem auf die Autobahn und führt dort selbst einige Fahrstreifenwechselmanöver durch. Nachdem der Proband bestätigt, sich ausreichend mit dem Fahrzeug vertraut gemacht zu haben, schaltet der Versuchsleiter das Automationssystem frei und erklärt dem Proband, dass er dieses nun über die entsprechende Taste aktivieren kann. Das Fahrstreifenwechselmanöver wird dabei zunächst blockiert. Nach mehreren Kilometern automatisierter Folgefahrt sowie einigen Probeübernahmeaufforderungen wird auch der automatisierte Fahrstreifenwechsel freigeschaltet. Das Fahrstreifenwechselmanöver wird in der Eingewöhnungsfahrt nacheinander in beiden Gestaltungsvarianten gefahren und die Reihenfolge über die Probanden permutiert. Während die Automation aktiv ist, ertönt in Abständen von einer Minute ein Klopfsignal über die Lautsprecher des Fahrzeugs, das den Probanden auffordert seinen Beanspruchungszustand anzugeben. Dieser wird von der Person auf der Rückbank des Fahrzeugs in den Logging-PC eingegeben.

Fahrversuch Teil 1 und 2

Im Anschluss an die Eingewöhnung folgen zwei identisch aufgebaute Versuchsteile, in denen je eine der beiden Gestaltungsvarianten des Fahrstreifenwechselmanövers gefahren wird. Die Reihenfolge der in den beiden Teilen gefahrenen Variante wird über die Probanden permutiert. Der Proband hält den Daumentaster während der Fahrt in der Hand und wird angewiesen diesen bei der Erkennung eines Fahrstreifenwechselmanövers zu betätigen. Der Beanspruchungszustand des Fahrers wird auch in diesen beiden Versuchsteilen abgefragt. Im Anschluss an jede Fahrt werden die in Anhang A.2 abgedruckten Fragen per Onlinefragebogen für die gerade gefahrenen Ausprägung ausgefüllt.

Fahrversuch Teil 3

Der letzte Versuchsteil ist optional, je nach Wunsch des Probanden. Der Proband erhält die Möglichkeit, noch einmal beide Ausprägungen im Wechsel zu fahren. Dabei werden ihm die Unterschiede der beiden Ausprägungen erklärt und er darf seine Gedanken dazu schildern.

Rolle des Wizards

Der Wizard hat während des Versuchs die Aufgabe, die Funktion des Automationsystems zu überwachen und die verbleibenden nicht technisch umgesetzten Aufgaben zu übernehmen. Insbesondere beinhaltet dies die Aktivierung und Freigabe des Fahrstreifenwechselmanövers (vgl. Abbildung 4.11). Erkennt der Wizard eine Fehlfunktion oder eine Verkehrssituation, die das Automationssystem nicht beherrscht, so hat er zwei Möglichkeiten: Er kann entweder über den Controller eine Übernahmeaufforderung auslösen, die den Fahrer in visueller und akustischer Form auffordert die Fahrzeugführung zu übernehmen oder in zeitkritischen Fällen das System selbst deaktivieren und den Probanden mündlich zur sofortigen Übernahme auffordern. Details zur Instruktion des Wizards sind in Anhang A.3 zu finden.

6.5 Ergebnisse

Von den 20 teilnehmenden Probanden müssen drei für die Auswertung ausgeschlossen werden. Grund dafür ist eine schlechte Verfügbarkeit des Systems sowie zahlrei-

che Übernahmeaufforderungen durch die Automation aufgrund unzureichendem DGPS-Empfangs. Bei zwei weiteren Probanden traten Probleme bei der Bildaufzeichnung der Fahrerbeobachtungskamera auf, so dass bei diesen keine Analyse des Blickverhaltens stattfinden kann. Bei ebenfalls zwei Probanden kam es zu Unterbrechungen bei der Datenaufzeichnung. Die vorhandenen Daten zwischen den Unterbrechungen können jedoch ausgewertet werden. Es verbleiben damit 13 vollständige und 2 unvollständige Datensätze für die Auswertung der Blickdaten sowie 15 vollständige und 2 unvollständige Datensätze für die Auswertung der Fahrstreifenwechsellernungszeit. Ein auswertbarer Fragebogen liegt für 17 Probanden vor. Tabelle 6.5 gibt eine Übersicht über die Anzahl der erfassten automatisierten Fahrstreifenwechsel. Es wird hinsichtlich Fahrstreifenwechselart, der Versuchsbedingung bzw. der Gestaltungsausprägung sowie dem Vorliegen von Blickdaten differenziert. Für die weitere Betrachtung sind die Fahrstreifenwechsel nach links in der Standard- und Feedbackausprägung von Bedeutung.

Tabelle 6.5: Überblick über die in der Studie erfassten Fahrstreifenwechselmanöver

Fahrstreifenwechsel	Anzahl links	Anzahl rechts
Eingewöhnung	87	81
Standard-Fahrt	145	141
mit Blickdaten	127	124
Feedback-Fahrt	141	131
mit Blickdaten	134	123

Für die Betrachtung der Ergebnisse in den nächsten Abschnitten ist Folgendes zu beachten: In manchen Fällen sind Kennzahlen und Verteilungen für die Gesamtmenge an erfassten Fahrstreifenwechselmanövern unabhängig vom zugehörigen Probanden dargestellt. In anderen Fällen erfolgt zunächst eine Mittelung über alle Fahrstreifenwechsel eines Probanden, um anschließend die Verteilung über die 17 auswertbaren Probanden zu analysieren. Die jeweilige Variante ist den n-Werten in den Bildunterschriften zu entnehmen.

6.5.1 Fahrverhalten

Abbildung 6.9 zeigt den über alle Fahrstreifenwechsel nach links gemittelten Verlauf der Querposition des Fahrzeugs. Die x-Achse beschreibt die Zeit relativ zum Beginn der Durchführungsphase. Es ist deutlich die Asymmetrie der gefahrenen Bahn zu erkennen. Der Abstand zwischen zwei Fahrstreifen beträgt durchschnittlich ca. 3,75 m. Bei einer

Fahrzeugbreite von ca. 2 m kann aus der Abbildung abgelesen werden, dass das Fahrzeug im Mittel nach etwa 2 s die Fahrstreifenbegrenzung überfährt.

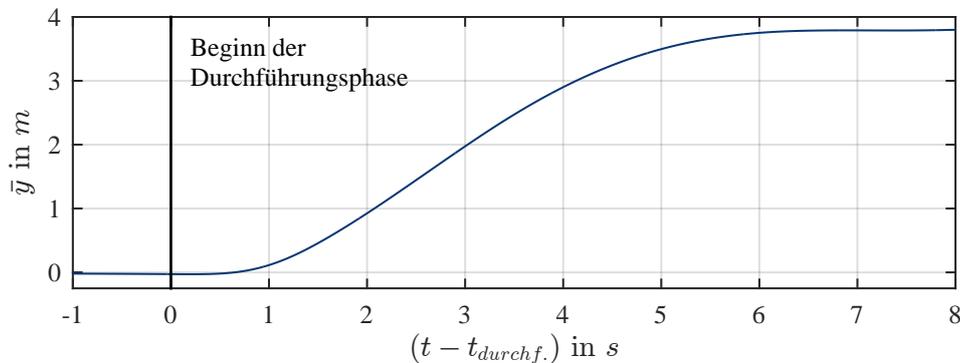


Abbildung 6.9: Gemittelter Querpositionsverlauf relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels nach links (exemplarisch für die Standardausprägung, $n=145$)

Abbildungen 6.10 und 6.11 zeigen den Mittelwert sowie die Standardabweichung der gemessenen Quer- und Längsbeschleunigung für beide Versuchsbedingungen. In beiden Ausprägungen ist ebenfalls die asymmetrische Form der Querbewegung zu erkennen. In der Standardausprägung setzen Längs- und Querbewegung gleichzeitig ein. Bei der Feedbackausprägung beginnt die Längsbeschleunigung, wie vorgesehen, bereits in der Vorbereitungsphase. Zudem zeigt sich hier auch der S-förmige Querbewegungsverlauf für den Aufbau des vorbereitenden Querversatzes zum Zielfahrstreifen.

Die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn der Vorbereitungsphase und dem Beginn der Durchführungsphase hängt, wie bereits erläutert, vom Verhalten des Wizards sowie der Verkehrssituation ab. Abbildung 6.12 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Beginns der Vorbereitungsphase in der Feedbackausprägung. Diese liegt im Mittel bei etwa $-3,3\text{ s}$. Die Streuung des Vorbereitungszeitpunktes führt dazu, dass die vorbereitenden Beschleunigungen in Abbildung 6.11 verschwimmen. Um diesen Effekt zu verhindern, sind die Beschleunigungsverläufe in Abbildung 6.13 nochmals relativ zum Beginn der Vorbereitungsphase dargestellt.

Die Analyse des Fahrverhaltens zeigt, dass das vor dem Versuch qualitativ entworfene Fahrverhalten (vgl. Abbildung 6.3) auch im Versuchsfahrzeug abgebildet wird. Lediglich die Querbewegung zum Aufbau des Querversatzes in der Vorbereitungsphase erreicht im Mittel nur einen Wert von ca. $0,2\text{ m/s}^2$ anstatt der gewünschten $0,5\text{ m/s}^2$. Dies ist vermutlich durch die „weiche“ Auslegung der Regler auf Stabilisierungsebene zu erklären, die den Sollverlauf glätten. Ob die Probanden die Querbewegung dennoch wahrnehmen wird an späterer Stelle geklärt.

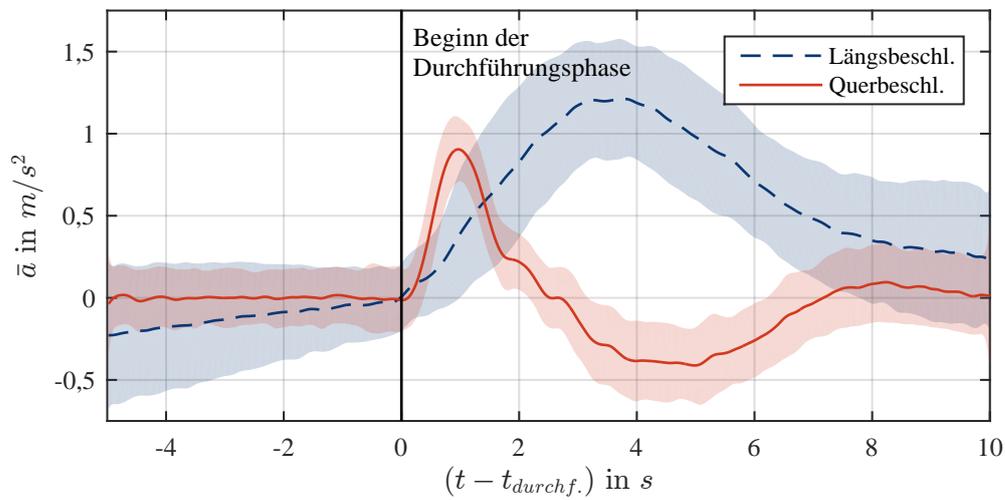


Abbildung 6.10: Gemittelter Beschleunigungsverlauf relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels nach links in der Standardausprägung (n=145, Standardabweichung schattiert dargestellt)

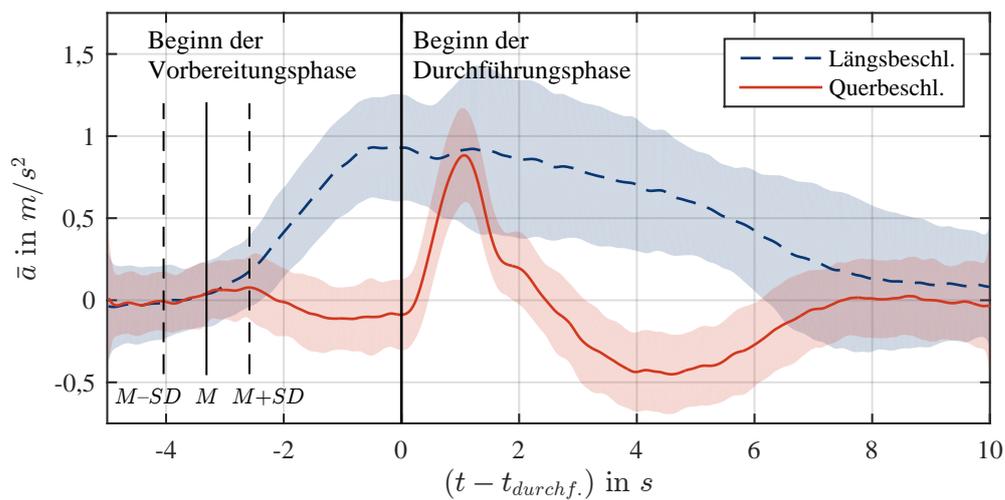


Abbildung 6.11: Gemittelter Beschleunigungsverlauf relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels nach links in der Feedbackausprägung (n=141, Standardabweichung schattiert dargestellt)

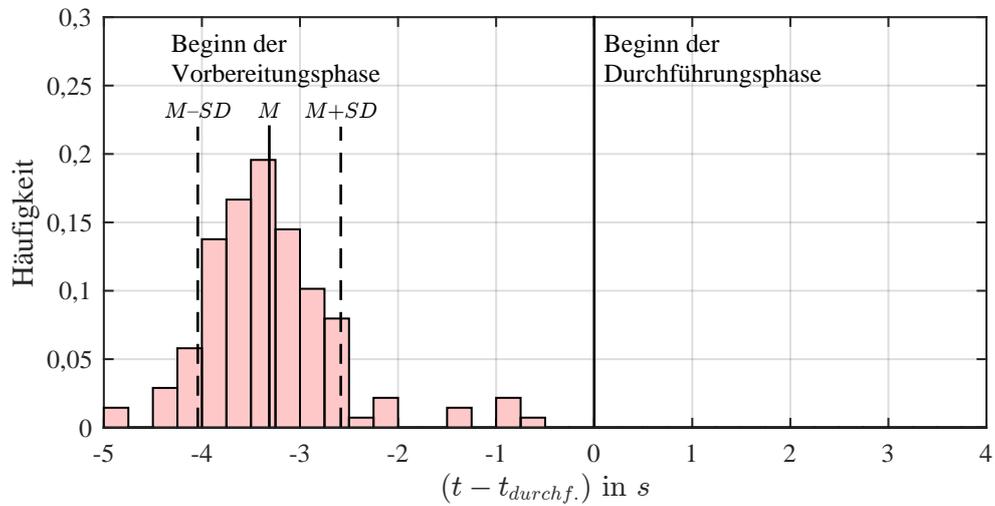


Abbildung 6.12: Häufigkeitsverteilung der Startzeitpunkte für die Vorbereitungsphase der Fahrstreifenwechsel nach links in der Feedbackausprägung (n=141)

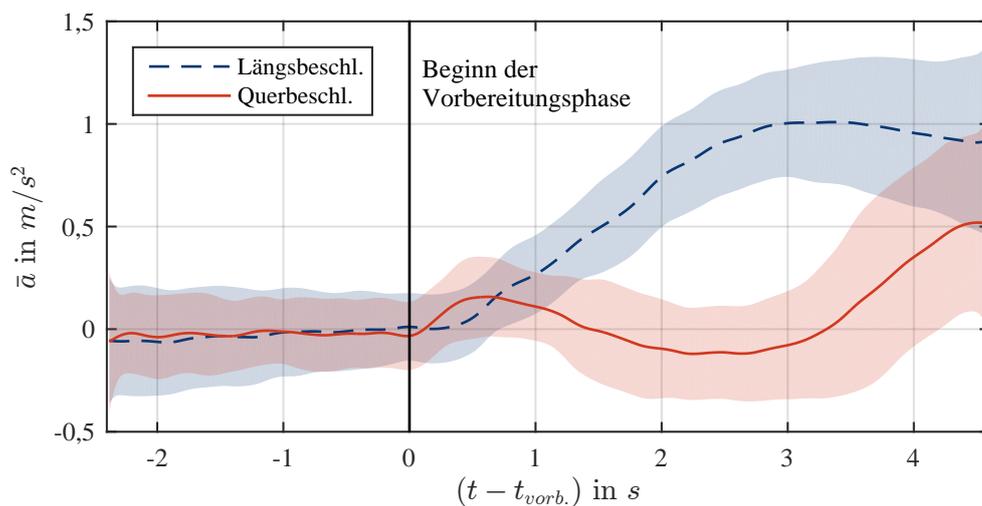


Abbildung 6.13: Gemittelter Beschleunigungsverlauf relativ zum Beginn der Vorbereitung des Fahrstreifenwechsels nach links in der Feedbackausprägung (n=141, Standardabweichung schattiert dargestellt)

6.5.2 Fahrstreifenwechseleerkennungszeit

In Abbildung 6.14 ist die Verteilung der Erkennungszeiten $\Delta t_{\text{erkenn.}}$ für alle Fahrstreifenwechsel nach links in beiden Ausprägungen in Form eines Histogramms visualisiert. Die über alle Probanden und Fahrstreifenwechsel je Ausprägung gebildeten Mittelwerte sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

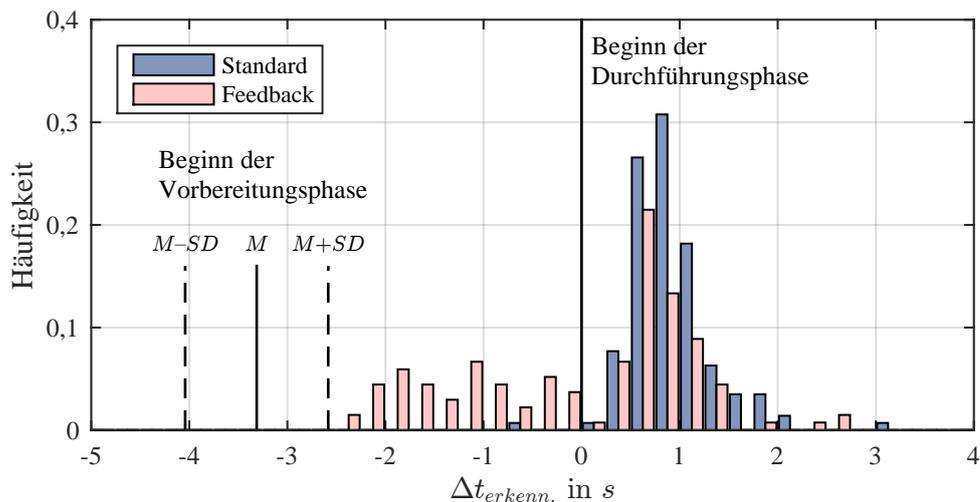


Abbildung 6.14: Häufigkeitsverteilung der Fahrstreifenwechseleerkennungszeiten über alle Fahrstreifenwechsel nach links (n=286)

In der Feedbackausprägung erstreckt sich die Häufigkeitsverteilung über einen deutlich weiteren Bereich als in der Standardausprägung und es werden häufiger negative Erkennungszeiten gemessen. Die Erkennungszeitpunkte für die Feedbackausprägung lassen sich in zwei Kategorien aufteilen: Trigger, die in der Vorbereitungsphase des Manövers erfolgten, und Trigger, die in der Durchführungsphase erfolgten. Die Verteilung der zweiten Kategorie ist der Verteilung der Standardausprägung sehr ähnlich. In der Feedbackausprägung erfolgen 42% der Triggerzeitpunkte vor dem Beginn der Durchführungsphase. Eine Betrachtung einzelner Probanden zeigt, dass sich das Kollektiv jedoch nicht auf die beiden Kategorien aufteilt, sondern ein und dieselbe Person manchmal bereits in der Vorbereitung und manchmal erst in der Durchführung den Daumentaster betätigt.

Zur Prüfung von Hypothese 1a wird je Proband und Versuchsbedingung die mittlere Erkennungszeit $\Delta \bar{t}_{\text{erkenn.}}$ berechnet. Die Differenz von $\Delta \bar{t}_{\text{erkenn.}}$ jedes Probanden zwischen Standard- und Feedbackausprägung ist in Abbildung 6.15 als Histogramm dargestellt. Lediglich eine Versuchsperson erkennt den Fahrstreifenwechsel in der Standardausprägung im Mittel früher als in der Feedbackausprägung. Bei allen anderen treten in der Feedbackausprägung geringere Erkennungszeiten auf. Demnach ist die mittlere Fahr-

Tabelle 6.6: Mittelwert, Median und Wertebereich der Fahrstreifenwechselerkennungszeit über alle Fahrstreifenwechsel nach links

	M	Mdn	Min	Max
Standard (n=145)	0,92 s	0,86 s	-0,60 s	3,18 s
Feedback (n=141)	0,00 s	0,52 s	-2,32 s	2,68 s

streifenwechselerkennungszeit je Proband in der Feedbackausprägung ($Mdn = 0,10$) signifikant geringer als in der Standardausprägung ($Mdn = 0,89$), $T = 151$; $p < 0,01$; $r = 0,60$ (Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test). Hypothese 1a kann damit angenommen werden.

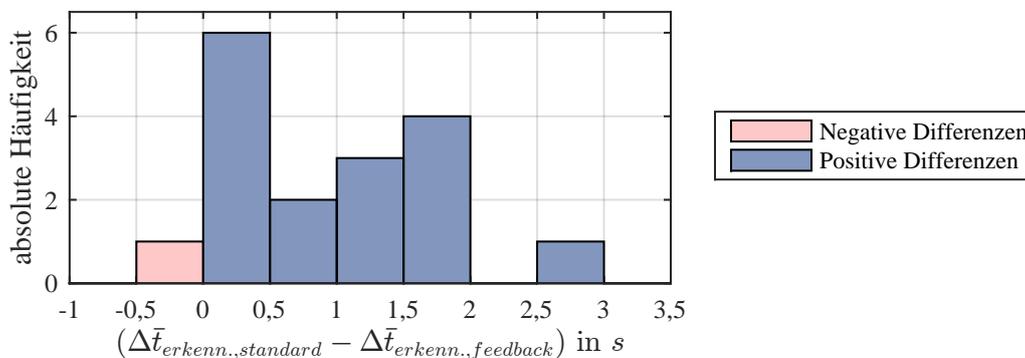


Abbildung 6.15: Häufigkeitsverteilung der Differenzen der mittleren Fahrstreifenwechselerkennungszeiten aus Standard- und Feedbackausprägung (n=17)

6.5.3 AOI-Verteilung

In Abbildungen 6.16 und 6.17 ist für die beiden Gestaltungsvarianten die AOI-Verteilung über die Zeit relativ zu $t_{durchf.}$ dargestellt. Die Zeitachse ist in $0,2 s$ breite Intervalle unterteilt. Auf der y-Achse ist der Anteil der Fahrstreifenwechsel aufgetragen, in denen der Proband im entsprechenden Intervall in die jeweilige AOI geblickt hat.

In beiden Ausprägungen ist erkennbar, dass der Großteil der Blicke nach vorne auf die Straße gerichtet ist. Vor dem Fahrstreifenwechsel ist der Anteil mit ca. 60 % jedoch geringer als nach dem Wechsel mit ca. 80 %. Insbesondere knapp 2 s nach dem Beginn der Durchführungsphase und damit kurz vor dem Überfahren der Fahrstreifenbegrenzung ist in beiden Ausprägungen eine deutliche Verschiebung der AOI-Verteilung in Richtung des linken Außenspiegels zu beobachten. Kurz darauf mündet diese wieder in einer größtenteils nach vorne gerichteten Verteilung. Dieses Muster lässt sich als Absiche-

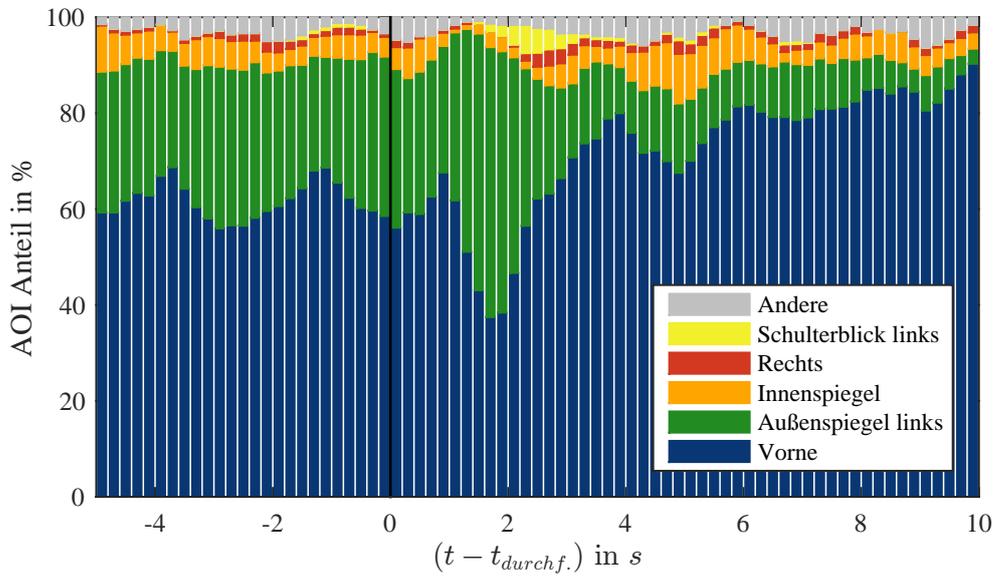


Abbildung 6.16: AOI-Anteile relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels nach links in der Standardausprägung (n=127)

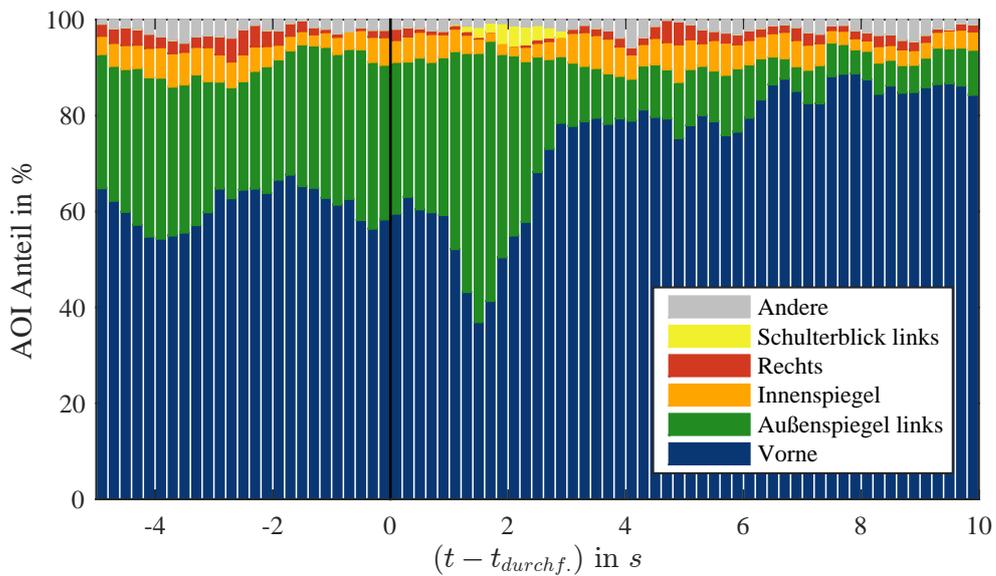


Abbildung 6.17: AOI-Anteile relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels nach links in der Feedbackausprägung (n=134)

rungsblick während des Wechsels interpretieren. Das Blickverhalten vor dem Wechsel ist in beiden Ausprägungen ebenfalls sehr ähnlich.

Während des Versuchs fällt auf, dass die Probanden im Zeitraum vor dem Wechsel, in dem das Fahrzeug einem langsameren Vorderfahrzeug folgt, den rückwärtigen Verkehr sehr sorgfältig beobachten und viele Blickwechsel stattfinden. Vergleicht man die mittlere Anzahl der AOI-Wechsel n_{AOI} je Proband im relevanten Zeitintervall von $-3 s$ bis $0 s$ vor dem Beginn der Fahrstreifenwechseldurchführung für die beiden Gestaltungsvarianten, so zeigen sich die in Abbildung 6.18 dargestellten Werte. Während der Median in beiden Versuchsbedingungen bei ca. 2 Blickwechseln liegt, ist die Streuung in der Feedbackausprägung deutlich größer als in der Standardausprägung. Der Mittelwert der AOI-Wechsel über alle Probanden ist in der Feedbackausprägung um 0,23 höher als in der Standardausprägung. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Versuchsbedingungen lässt sich damit jedoch nicht feststellen $T = 82$; $p = 0,21$; $r = 0,23$ (Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test). Hypothese 2 muss abgelehnt werden.

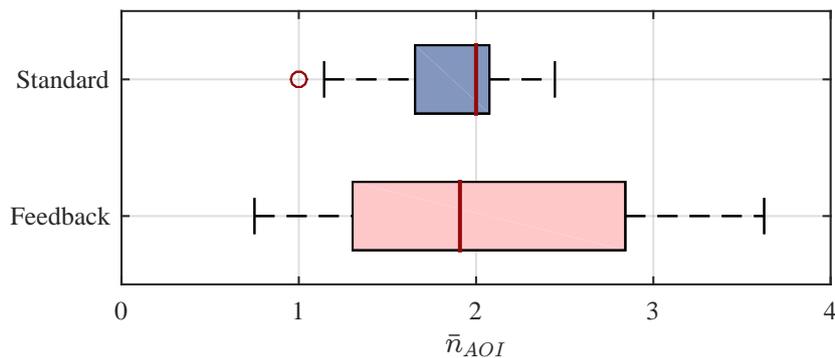


Abbildung 6.18: Anzahl der AOI-Wechsel in einem Zeitintervall von -3 bis $0 s$ vor $t_{durchf.}$ ($n=15$)

6.5.4 Fragebogen

Im Folgenden werden die Fragebogenergebnisse zur subjektiven Bewertung des Fahrverhaltens beim Fahrstreifenwechsel inklusive einer Zusammenfassung der Kommentare der Probanden in den Freitextfeldern geschildert. Außerdem werden die Ergebnisse der Befragung zum Vertrauen in das Automationssystem präsentiert.

Subjektive Bewertung

Abbildung 6.19 visualisiert die Ergebnisse des Fragebogenteils zur subjektiven Bewertung der von den Probanden erlebten Fahrstreifenwechselmanöver nach links. Die Subjektivurteile der Probanden weisen eine hohe Streuung auf, fallen aber für beide Gestaltungsvarianten tendenziell positiv aus. Ein signifikanter Unterschied der Ergebnisse der beiden Versuchsbedingungen ist lediglich für das Item zur Vorhersehbarkeit festzustellen. Der Fahrstreifenwechsel wird in der Feedbackausprägung als signifikant vorhersehbarer beurteilt als in der Standardausprägung, $T = 71$; $p < 0,05$; $r = 0,43$ (Wilcoxon Vorzeichen-Rang-Test). Dieses Ergebnis unterstreicht das Resultat der objektiven Messung der Erkennungszeit. Hypothese 1b kann demnach ebenfalls angenommen werden.

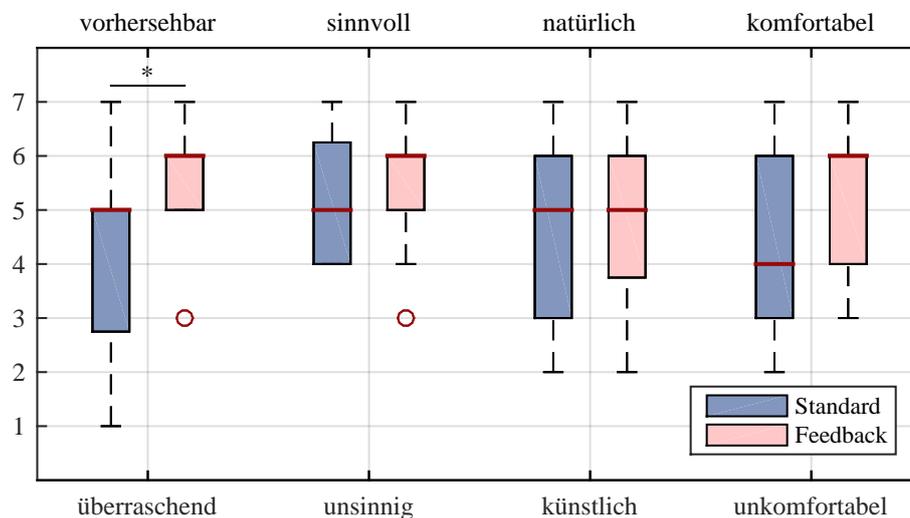


Abbildung 6.19: Ergebnis der Befragung zur Vorhersehbarkeit der erlebten Fahrstreifenwechsel nach links (n=17)

Abbildung 6.20 stellt die Antworten der Probanden zur Beurteilung der Dynamik der Querbewegung beim Fahrstreifenwechsel dar. Da die Querbewegung bis auf den vorbeireitenden Querversatz der Feedbackausprägung in beiden Ausprägungen identisch war, liegt es nahe, dass die Bewertung der beiden Ausprägungen auch sehr ähnlich ausfällt. Insgesamt bewerten die Probanden die Dynamik des Manövers in beiden Varianten weder besonders sanft bzw. gering, noch besonders ruckartig bzw. hoch.

Freitextkommentare

Neben den Multiple-Choice Fragen enthält der Fragebogen Freitextfelder zur Beurteilung des automatisierten Fahrstreifenwechselmanövers. Zur Auswertung der Freitextfel-

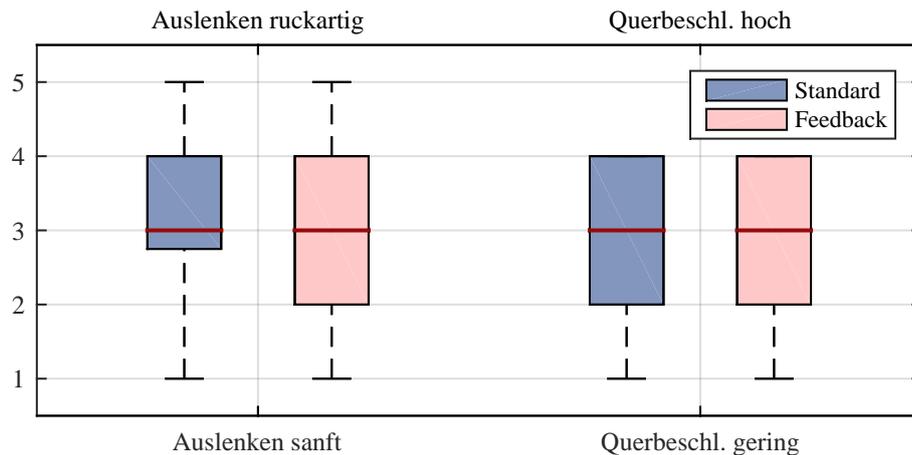


Abbildung 6.20: Ergebnis der Befragung zur Dynamik der erlebten Fahrstreifenwechsel nach links (n=17)

der werden die Angaben der Probanden zu Clustern ähnlicher Antworten zusammengefasst und die Anzahl der Antworten je Cluster für Standard- und Feedbackausprägung gezählt. Tabelle 6.7 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung.

Hinsichtlich der Vorhersehbarkeit des Fahrstreifenwechselmanövers zeigt sich, dass viele Probanden dieses alleine durch die Verkehrssituation antizipieren konnten. Im Detail verweisen die Probanden hier auf die gewählte Systemauslegung, die vor jedem Fahrstreifenwechsel eine stationäre Folgefahrt fordert. Da dies bei beiden Funktionsausprägungen der Fall war, ist hier kein nennenswerter Unterschied zwischen Standard- und Feedbackausprägung zu sehen. Als Grund für die Vorhersehbarkeit des Manövers wird in der Feedbackausprägung häufig die vorgezogene Längsbeschleunigung in der Vorbereitungsphase genannt. Als unvorhersehbar beschreiben einige Probanden die nicht vorhandene Längsbeschleunigung sowie die abrupte Querbeschleunigung zu Beginn des Wechsels in der Standardausprägung.

Während die erste Frage verdeutlicht, dass der Übergang in die Folgefahrt vor jedem Fahrstreifenwechsel das Manöver vorhersehbar macht, zeigt die zweite Frage in Tabelle 6.7, dass dies häufig auch als unnatürliches Verhalten empfunden wird und der Wunsch nach einem „fliegenden“ Wechsel aus der Freifahrt heraus besteht. Die weiteren Antwortcluster beziehen sich auf die Längs- und Querdynamik des Wechsels. Fünf Probanden nennen in der Standardausprägung eine zu geringe Längsbeschleunigung beim Wechsel. Es liegt die Vermutung nahe, dass hierbei nicht die Absolutbeschleunigung gemeint ist, welche in der Standardausprägung sogar höher ist (vgl. Abbildungen 6.10 und 6.11), sondern die fehlende Beschleunigung in der Vorbereitungsphase. Demgegenüber beurteilen in der Feedbackausprägung drei Probanden die Längsbeschleunigung als natürlich, im Gegensatz zu einem Probanden in der Standardausprägung. In bei-

den Ausprägungen geben jeweils fünf Probanden an, dass sich der Fahrstreifenwechsel aufgrund einer zu hohen Querschleunigung unnatürlich anfühlte.

Tabelle 6.7: Analyse der Antworten in den Freitextfeldern des Fragebogens

Frage: Warum war der Fahrstreifenwechsellvorgang nach links für Sie vorhersehbar oder nicht vorhersehbar?					
Antwort-Cluster:	Vorhersehbar durch Verkehrssituation	Vorhersehbar, da Längsbeschleunigung vor dem Ausscheren	Unvorhersehbar, da keine Längsbeschleunigung vor dem Ausscheren	Unvorhersehbar durch abrupte Querschleunigung	
Standard	10	1	3	2	
Feedback	8	10	0	0	

Frage: Welche Aspekte des Fahrstreifenwechsellvorgangs nach links fanden Sie eher künstlich oder eher natürlich?					
Antwort-Cluster:	künstlich, aufgrund Abbremsen vor dem FSW	künstlich, da zu wenig Längsbeschleunigung	natürliche Längsbeschleunigung	künstlich, Querbeschleunigung zu stark	natürliche Querbeschleunigung
Standard	5	5	1	5	2
Feedback	7	0	3	5	0

Vertrauen

Das nach dem Fragebogen von Jian et al. (2000) erfasste Systemvertrauen errechnet sich durch eine Mittelwertbildung über die 12 abgefragten 7-stufigen Items. Einige der Items müssen dazu zunächst umkodiert werden. Tabelle 6.8 stellt die Ergebnisse für die Standard- sowie die Feedback-Ausprägung gegenüber. Außerdem sind zum Vergleich die Ergebnisse der von Gold et al. (2015) durchgeführten Simulatorstudie dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Probanden ein durchschnittlich hohes Systemvertrauen haben. Die Werte liegen im Bereich der von Gold et al. (2015) ermittelten oder sogar etwas darüber.

In der Feedbackausprägung ist das Systemvertrauen im Mittel um 0,17 Punkte höher als in der Standardausprägung. Ein signifikanter Unterschied lässt sich nicht feststellen.

Tabelle 6.8: Gemessenes Systemvertrauen

Trust in Automation (Jian et al., 2000)	Gold et al. (2015)	Standard	Feedback
Mittelwert	4,6 - 5,5	5,42	5,59
Standardabweichung	1,0 - 1,5	0,99	0,70

6.5.5 Mentale Beanspruchung

Die von den Probanden angegebene mentale Beanspruchung wird über alle Probanden über die Zeit, in der die Automation aktiv ist gemittelt. Abbildung 6.21 stellt den Verlauf der Beanspruchung für die drei Versuchsteile Eingewöhnung (mit aktiver Automation), Feedbackausprägung und Standardausprägung gegenüber. Aufgrund der verkehrsbedingt unterschiedlich langen Fahrzeiten der einzelnen Probanden, stützt sich der gebildete Mittelwert auf eine mit der Fahrzeit abnehmende Anzahl von Probanden. Bis zu einer Fahrzeit von ca. 10 Minuten in der Eingewöhnung und ca. 13 Minuten in den beiden Bewertungsteilen können alle Probanden berücksichtigt werden. Eine Anzahl von 12 Probanden ist bei ca. 11 Minuten Fahrzeit für die Eingewöhnung und ca. 16 Minuten Fahrzeit für die beiden Bewertungsteile enthalten. Mögliche Gewöhnungseffekte, welche sich durch die Reihenfolge der dargebotenen Funktionsausprägungen ergeben könnten, werden durch die Permutation der Darbietungsreihenfolge kompensiert.

Die Abbildung zeigt, dass das Beanspruchungsniveau im Mittel über die Fahrzeit leicht sinkt. Die Probanden sind im Allgemeinen „neutral“ bis „entspannt“. Der deutliche Anstieg zu Beginn der Eingewöhnungsfahrt ist dadurch zu erklären, dass die Probanden aus der manuellen Fahrt kommen und die Beanspruchungsmessung auf Grund der nur minütlichen Erfassung verzögert ist. Der Anstieg verdeutlicht jedoch auch, dass die automatisierte Fahrt für die Probanden zunächst beanspruchender ist, als die manuelle Fahrt. Gegen Ende des jeweiligen Versuchsteils liegt der Wert jedoch wieder auf einem ähnlichen Niveau wie bei der manuellen Fahrt bzw. sogar darunter. Insgesamt bewegen sich die mittleren Beanspruchungswerte in einem schmalen Bereich. Ein nennenswerter Unterschied in der Beanspruchung zwischen den beiden Funktionsausprägungen ist nicht zu erkennen. Tendenziell befindet sich die Kurve der Standardausprägung jedoch insbesondere zu Beginn des Versuchsteils über der Kurve für die Feedbackausprägung. Eventuell ist dies ein Indiz dafür, dass sich die Probanden in der Feedbackausprägung

schneller an das System gewöhnen. Eine klare Aussage zur deskriptiven Fragestellung 2 kann auf Basis der gezeigten Daten jedoch nicht getätigt werden.

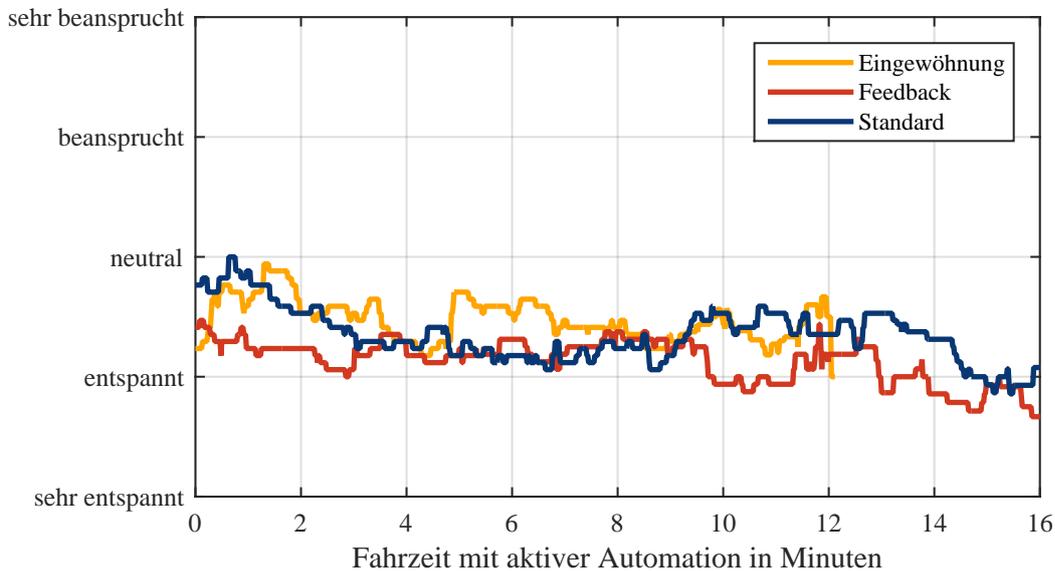


Abbildung 6.21: Gemittelte mentale Beanspruchung über die Fahrzeit (n = 17)

6.6 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich durch eine im Sinne der Empfehlungen aus Kapitel 3 gestalteten Fahrzeugbewegung beim Fahrstreifenwechsel, die Vorhersehbarkeit des Manövers sowohl in Form des Erkennungszeitpunkts, als auch hinsichtlich der Beurteilung der Fahrer signifikant verbessern lässt. Während die Urteile der Probanden für eine Erhöhung der Akzeptanz des Automationssystems sprechen, kann aus dem früheren Erkennungszeitpunkt eine Verbesserung der Sicherheit des Gesamtsystems aus Fahrer und Automation abgeleitet werden.

Eine Frage, die sich bei Betrachtung der Verteilung der Erkennungszeitpunkte aus Abbildung 6.14 stellt, ist, warum in der Feedbackausprägung nur 42% der Fahrstreifenwechsel bereits in der Vorbereitungsphase erkannt wurden. Dies könnte mehrere Gründe haben: Einerseits ist es möglich, dass die Probanden bei den restlichen 58% der Fahrstreifenwechsel mental so stark mit der Fahrsituation beschäftigt waren, dass sie die Beschleunigung nicht wahrgenommen oder die Betätigung des Daumentasters vernachlässigt haben. Eine andere Möglichkeit ist, dass die Probanden die Beschleunigung zwar wahrgenommen haben, sich aber nicht sicher waren, ob der Fahrstreifenwechsel erfolgt, bis das Fahrzeug tatsächlich ausgeschert ist. Um hierzu differenziertere Aussagen treffen

zu können, sind Alternativen zur Daumentasterbetätigung als Metrik zur Erfassung des vom Fahrer angenommenen Systemzustandes in Betracht zu ziehen.

Die Analyse der Blickdaten ist eine solche Alternative. Die Daten aus dem Fahrversuch zeigen, dass die Probanden das Fahrzeugumfeld genau überwachen und, unabhängig von der Versuchsbedingung, im Mittel mehrere Blickwechsel im relevanten Zeitintervall vor dem Fahrstreifenwechsel tätigen. Dies macht es schwierig, einen isolierten Absicherungsblick als Reaktion auf die Bewegungsrückmeldung zu identifizieren. Es zeigt sich auch kein signifikanter Unterschied in der Anzahl an Blickwechseln in der Vorbereitungsphase. Es ist zu vermuten, dass das beobachtete Verhalten zu einem großen Teil durch den Erstkontakt mit einem Automationssystem im Fahrzeug bedingt ist und, dass die Überwachungsleistung nach längerer fehlerfreier automatisierter Fahrzeit immer mehr nachlässt. In folgenden Studien sollten deshalb insbesondere Langzeiteffekte betrachtet werden und untersucht werden, ob die Bewegungsrückmeldung in der Lage ist, die gute Überwachungsleistung des Fahrers aufrecht zu erhalten.

Die Betrachtung der subjektiven Bewertung des Fahrstreifenwechselmanövers durch die Probanden zeigt, dass die gewählte Systemgestaltung unabhängig von der spezifischen Ausprägung von den Probanden tendenziell positiv bewertet wird. Die auf Basis der ersten Studie sowie den Literaturangaben gewählte Dynamik liegt auf einem akzeptierten Niveau und das in der ersten Studie bemängelte zu starke Einlenken auf den Zielfahrstreifen wird nach Umsetzung der asymmetrischen Querbewegung nicht mehr negativ erwähnt. Insbesondere zeigen die Ergebnisse, dass sich die in der ersten Studie ermittelten Quereschleunigungswerte für das Freifahrtszenario bei 60 km/h auch für höhere Geschwindigkeiten und das Folgefahrtszenario anwenden lassen. Aus den Gesprächen im optionalen dritten Teil der Studie wird deutlich, dass es den Probanden teilweise schwer fällt, zwischen den Kenngrößen Ruck und Beschleunigung zu differenzieren. Auch wenn die Bewertung gemäß Abbildung 6.20 sehr ähnlich ausfällt, zeigt sich im Gespräch mit den Probanden, dass weniger die absolute Quereschleunigung als vielmehr der Ruck als tendenziell zu hoch angesehen wird.

Aus den Antworten zu den Freitextfragen wird deutlich, dass sich vor allem die vorgezogene Längsbeschleunigung positiv auf die Vorhersehbarkeit des Manövers auswirkt. Der vorbereitende Querversatz in Richtung des Zielfahrstreifens wird von keinem Probanden in den Freitextfragen erwähnt und auch im nachfolgenden Gespräch wird deutlich, dass dieser größtenteils nicht wahrgenommen wird. Dies liegt höchstwahrscheinlich an der vergleichsweise niedrigen Dynamik der Querbewegung (vgl. Abbildung 6.13), welche entweder im Rauschen (vgl. Abbildung 6.2) untergeht oder von der dominanteren Längsbeschleunigung verdrängt wird. In weiteren Untersuchungen sollte der vorberei-

tende Querversatz mit einer höheren Dynamik und unter Umständen ohne simultane Längsbeschleunigung untersucht werden.

Die von den Probanden angegebene mentale Beanspruchung sowie das Vertrauen in die Automation fällt in Anbetracht des Erstkontakts aller Probanden mit einem derartigen System überraschend gut aus. Insbesondere wäre zu erwarten gewesen, dass die dauerhafte Beobachtung der Automation für den Fahrer eine starke Beanspruchung darstellt. Die gemessenen Beanspruchungswerte aus Abbildung 6.21 signalisieren jedoch das Gegenteil.

Es ist zu betonen, dass das in dieser Studie in Form der Feedbackausprägung gewählte Fahrverhalten nicht zwingend dem natürlichen Fahrverhalten eines menschlichen Fahrers entspricht (vgl. z.B. Salvucci & Liu, 2002). Zudem ist es auch nicht die naheliegende Art und Weise, wie ein Fahrstreifenwechselmanöver in einem Automationssystem technisch umgesetzt werden würde. Zwar sind dem Fahrstreifenwechselmanöver vorgelagerte Längsbeschleunigungen durchaus in technischen Umsetzungen (z.B. Ardelt et al., 2012) als auch bei menschlichen Fahrern (z.B. Ehmanns, 2002) zu finden, jedoch wird damit immer das Ziel verfolgt sich bezüglich einer Lücke auf dem Nachbarfahrstreifen zu positionieren. Beim Wechsel auf einen freien Zielfahrstreifen ist ein Beschleunigen oder Verzögern vor dem Fahrstreifenwechsel aus technischer Sicht nicht notwendig. Die Ergebnisse der durchgeführten Studie belegen jedoch, dass es im Falle einer teilautomatisierten Fahrt durchaus von Vorteil ist dem Fahrer, unabhängig von der Konstellation der Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen, in Form einer überschwelliger Längsbeschleunigung Rückmeldung über das bevorstehende Fahrmanöver zu geben.

Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.5.1 genannte Fragestellung, ob die Automation den selben Fahrstil aufweisen sollte wie der Fahrer (vgl. Scherer et al., 2016; Griesche et al., 2016) kann gesagt werden, dass dies nicht immer sinnvoll ist. Ein menschlicher Fahrer weiß in manueller Fahrt selbst was er tut und es besteht für ihn keine Notwendigkeit dies an jemanden zurückzumelden. Er wird sein Fahrverhalten daher auch nicht an diesem Ziel ausrichten. Für die teilautomatisierte Fahrt ist dies aus den in dieser Arbeit beschriebenen Gründen jedoch durchaus notwendig. Eine generelle Orientierung des Fahrverhaltens der Automation am Fahrverhalten eines individuellen Fahrers ist daher nicht zielführend. Stattdessen muss bei der Auslegung, wie in dieser Arbeit geschehen, der Informationsgehalt des Fahrverhaltens im Vordergrund stehen. Grundsätzliche Fahrereigenschaften wie z.B., ob es sich um einen eher dynamisch oder komfortabel fahrenden Fahrer handelt, sollten jedoch, wie die Ergebnisse der ersten Studie zeigen, berücksichtigt werden.

Die in dieser Arbeit entworfene Feedbackausprägung stellt einen Vorschlag dar, wie der Fahrstreifenwechsel nach Links aus der Folgefahrt heraus gestaltet werden kann. Das Fahrverhalten für weitere Fahrsituationen wie z.B. den Fahrstreifenwechsel nach Rechts sowie Fahrstreifenwechsel aus der Freifahrt heraus, muss für den Einsatz in zukünftigen Seriensystemen in ähnlicher Weise entworfen und untersucht werden. Für die Anwendung der Ergebnisse der in diesem Kapitel beschriebenen Studie auf zukünftige Automationssysteme sind einige Einschränkungen des Versuchs zu beachten. Allen voran ist, wie bereits erwähnt, die kurze Studiendauer zu berücksichtigen. Die Probanden erlebten nach einer Eingewöhnungsfahrt von ca. 10 Minuten jede der gezeigten Ausprägungen im Mittel für eine Dauer von ca. 15 Minuten. Trotz der großen Erfahrung in der manuellen und durch Fahrerassistenzsysteme unterstützten Autobahnfahrt, stellt die gleichzeitige Automation von Längs- und Querführung, inklusive automatisierter Fahrstreifenwechselentscheidung, für alle Probanden eine neuartige Situation dar. Bei längerer Nutzung des Automationssystems könnte einerseits wie erwähnt die Überwachungsleistung des Fahrers nachlassen, andererseits ist aber zu erwarten, dass der Fahrer ein genaueres mentales Modell der Automation entwickelt. Wenn dieses Modell dann auch die vorbereitenden Fahrzeugbewegungen der Feedbackausprägung enthält, wird dies die Vorhersehbarkeit des Fahrverhaltens weiter verbessern. Der Fahrer wird sich also irgendwann merken: „Bevor das Fahrzeug zum Fahrstreifenwechsel nach Links ausschert, beginnt es immer erst zu beschleunigen“. Eine weitere Einschränkung für die Interpretation der Ergebnisse ist die Methode zur Messung des Erkennungszeitpunkts. Da der Proband die Aufgabe hat, den Daumentaster zu betätigen, wenn er ein Fahrstreifenwechselmanöver erkennt, ist anzunehmen, dass er sehr genau auf etwaige Anzeichen für einen Fahrstreifenwechsel achtet. In einer alltäglichen Fahrt mit einem teilautomatisierten System ist der Fahrer vermutlich weniger aufmerksam.

Um den tatsächlichen Mehrwert der Feedbackausprägung vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Sicherheit des Gesamtsystems aus Fahrer und Automationssystem zu bewerten, ist es sinnvoll, die Überwachungsleistung der Probanden bei Fehlentscheidungen der Automation zu untersuchen. Aus Sicherheitsaspekten bieten sich dazu weitere Studien in einem dynamischen Fahrsimulator an.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Bedarf nach Rückmeldung von Informationen des Automationssystems an den Fahrer ist die zentrale Motivation für diese Arbeit. Ziel dieser Rückmeldung ist die Unterstützung des Situationsbewusstseins des Fahrers während einer teil- oder hochautomatisierten Fahrt. Die Rückmeldung selbst erfolgt in vorliegender Arbeit über die vestibuläre Wahrnehmung des Fahrers und wird durch die gezielte Gestaltung der automatisierten Fahrzeugbewegung beeinflusst. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 wird der Forschungsbedarf für diese Arbeit in Form von vier Forschungsfragen detailliert (Abschnitt 2.6). Für die Beantwortung der Fragen wurde ein prototypisches Automationssystem für die Autobahnfahrt entworfen, das sich insbesondere durch eine flexible Parametrierbarkeit des operativen Fahrstreifenwechselverhaltens auszeichnet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse gliedert sich entsprechend der formulierten Forschungsfragen.

Wünscht bzw. akzeptiert der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs vestibuläre Rückmeldung zum Zustand des Automationssystems?

Gemäß den Ergebnissen der, im Rahmen der ersten Studie (Kapitel 5) durchgeführten Befragung kann diese Forschungsfrage für ein teilautomatisiertes System, bei dem der Fahrer die Aufgabe hat, das Fahrzeugumfeld sowie das Automationssystem kontinuierlich zu überwachen, deutlich mit ja beantwortet werden. 87% der Befragten haben in diesem Fall das Bedürfnis nach spürbaren Fahrzeugbewegungen als Rückmeldung über Zustand und Absicht des Automationssystems. Der im Anschluss an die Befragung durchgeführte Fahrversuch verdeutlicht diese Aussage. In einem vollautomatisierten System, bei dem sich der Fahrer vollständig aus der Fahraufgabe zurückziehen darf, wünscht sich die Mehrheit der Probanden (58% der Befragten) dagegen so wenig Dynamik wie möglich. Da der Nutzen der Rückmeldung primär in der Unterstützung der Überwachungsaufgabe liegt, ist dieses Ergebnis auch plausibel. Für den Fall der hochautomatisierten Fahrt erfolgt in der durchgeführten Studie keine Befragung. Die Beantwortung der Frage muss in diesem Fall auch differenzierter erfolgen. Der Fahrer, welcher sich auch in der Hochautomation einer fahrfremden Tätigkeit widmen darf, wird wahrscheinlich eine ähnliche Erwartung an die Fahrdynamik haben wie in der Vollautomation. Im Falle einer Übernahmeaufforderung an einer Systemgrenze ist je-

doch zu vermuten, dass ein durch die Rückmeldung verbessertes Situationsbewusstsein einen positiven Einfluss auf die Übernahmeleistung hat. Falls diese These bestätigt werden kann, sollte auch in der hochautomatisierten Fahrt eine möglichst umfassende Rückmeldung von Systeminformationen an den Fahrer stattfinden.

Welche Dynamiken der Fahrzeugbewegung akzeptiert der Fahrer eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs und wie können diese Akzeptanzschwellen ermittelt werden?

Zur quantitativen Ermittlung der vom Fahrer akzeptierten Dynamik wird in der ersten Studie die Methode der Herstellung gewählt. Im Gegensatz zur Bewertung verschiedener Gestaltungsvarianten durch den Probanden (vgl. Studie 2, Festner et al. (2016), Scherer et al. (2016)), wird bei dieser Methode das Auslegungsziel bzw. der subjektive Eindruck vorgegeben und die entsprechende Parametrierung durch den Probanden selbst hergestellt. Für die Ermittlung von Akzeptanzschwellen der Dynamik eines automatisierten Fahrmanövers bietet dies den Vorteil, dass das Auslegungsziel sehr genau formuliert werden kann und man einen direkten Messwert für die dafür notwendige Parametrierung erhält. Im Fahrversuch aus Studie 1 wird die Methode am Beispiel der Wechselzeit für das Manöver Fahrstreifenwechsel angewandt. Das Ergebnis ist eine quantitative Aussage zur akzeptierten Fahrstreifenwechselzeit für zwei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und Automationsstufen (vgl. Abbildung 5.5 und Tabelle 5.3). Die Studie zeigt, dass bei 30 *km/h* eine geringere Dynamik in Form der Fahrstreifenwechselzeit akzeptiert wird, als für 60 *km/h*. Darüber hinaus akzeptiert ein beobachtender Fahrer eine höhere Dynamik als ein nebenbeschäftigter Fahrer.

Die durchgeführte Studie stellt nur den Einstieg in ein großes Forschungsgebiet dar, welches sich mit der Frage beschäftigt, wodurch sich „angenehmes“ automatisiertes Fahrverhalten auszeichnet. Wie in Kapitel 2.5 dargelegt wurde, gibt es dazu bis heute nur sehr wenige Forschungsergebnisse. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das automatisierte Fahrverhalten eines der entscheidenden Differenzierungsmerkmale zukünftiger Automationssysteme sein wird. Die Identifikation der relevanten Einflussgrößen auf die Akzeptanz der automatisierten Fahrzeugbewegung sowie die Ermittlung deren optimaler Gestaltung bietet Potential für viele weitere Untersuchungen. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Methodik kann dafür als Vorlage dienen.

Für die Integration der Ergebnisse in zukünftige Automationssysteme müssen diese in bestehende Trajektorienplanungskomponenten integriert werden. Im konkreten Fall der identifizierten Einflüsse von Geschwindigkeit und Rolle des Fahrers auf die akzeptierte Querdynamik, sollten die beiden Faktoren in die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Kostenfunktionen eines Trajektorienplanungsmoduls einfließen. Kurze Fahrstreifenwechsel-

zeiten würden dadurch bei geringen Fahrgeschwindigkeiten zu hohen Kosten führen und durch das Automationssystem vermieden werden. Darüber hinaus würde die Manöverdynamik adaptiv an die aktuelle Rolle des Fahrers angepasst werden.

Nach welchen Gestaltungsempfehlungen sollte die automatisierte Fahrzeugbewegung ausgelegt werden, um für den Fahrer möglichst informativ zu sein?

Die Ergebnisse zur akzeptierten Fahrdynamik zeigen das Potential, die vom Fahrer wahrgenommene Fahrzeugbewegung als Rückmeldung über Zustand und Absicht des Automationssystems zu nutzen. Für die automatisierte Fahrzeugführung wird ein hoher Informationsbedarf des Fahrers auf der Manöverebene verortet. Das Ziel der Bewegungsrückmeldung ist es daher, die für ein Fahrmanöver charakteristischen Bewegungsmuster hervorzuheben, um Manövertransitionen für den Fahrer erkenntlich zu machen bzw. dessen Aufmerksamkeit zu erwecken. An eine derartige Rückmeldung werden die in Tabelle 3.1 definierten Anforderungen gestellt. Neben deutlich wahrnehmbaren Bewegungen, welche über den in Abschnitt 2.4.3 zusammengefassten Wahrnehmungsschwellen liegen, ist vor allem die Forderung nach einer rechtzeitigen Rückmeldung der Entscheidungen des Automationssystems hervorzuheben. Es zeigt sich, dass insbesondere für die Rückmeldung lateraler Fahrmanöver, wie dem Fahrstreifenwechsel, eine Erhöhung der Intensität der charakteristischen Bewegungsmuster alleine nicht ausreicht, um den Fahrer rechtzeitig über das Manöver zu informieren. Es müssen daher vorbereitende Bewegungselemente zur Ankündigung des bevorstehenden Manövers eingeführt werden.

Für das Fahrstreifenwechselmanöver nach Links aus der Fahrgasse heraus wird in dieser Arbeit eine entsprechende Umsetzung entwickelt. Als vorbereitende Bewegung wird bereits 2-3 s vor dem Ausscheren aus dem Startfahrstreifen ein lateraler Querversatz von 20 cm in Richtung des Zielfahrstreifens aufgebaut und eine deutlich überschwellige Beschleunigung in Längsrichtung ausgeführt. Dadurch kann der Fahrer das Manöver vestibulär wahrnehmen bevor durch eine, unter Umständen fehlerhafte, Entscheidung der Automation eine kritische Fahrsituation entsteht. Für den Einsatz der Bewegungsrückmeldung in zukünftigen Automationssystemen muss das Konzept um zusätzliche Manöver bzw. Automationszustände erweitert werden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die in Kapitel 3 beschriebenen Beta-Fehler dar, bei denen eine notwendige Reaktion des Automationssystems ausbleibt und der Fahrer folglich auch keine spürbare Rückmeldung erhält.

Um Fahrmanöver in der hier beschriebenen Form für den Fahrer klar erkennbar zu machen, ist es notwendig, dass die Manöver, wie in dieser Arbeit geschehen, explizit in Form einer Manöver- oder Taktikebene im Automationssystem repräsentiert sind

(vgl. Abbildung 4.4). Das Verhalten eines Planungsalgorithmus, welcher ohne explizite Manöverrepräsentation eine Trajektorie durch den Verkehr plant wird nur schwer vom Fahrer nachvollziehbar und überwachbar sein. Ein Automationssystem, welches noch auf den Fahrer als Überwacher und Rückfallebene angewiesen ist, sollte daher klar definierte Fahrmanöver unterscheiden und deren Ausführung dem Fahrer, am besten multimodal, deutlich und vor allem rechtzeitig zurückmelden.

Kann die Vorhersehbarkeit der Handlungen des Automationssystems durch diese Gestaltungsmaßnahmen verbessert werden?

Bei der Evaluierung des Rückmeldekonzpts in Kapitel 6 konnte anhand des Fahrstreifenwechsels gezeigt werden, dass durch die Rückmeldung Manöverentscheidungen der Automation für den Fahrer sowohl objektiv als auch subjektiv vorhersehbarer werden. Im Falle eines teilautomatisierten Systems, das durch den Fahrer dauerhaft überwacht werden muss, bringt dies einen entscheidenden Vorteil. Die frühere Erkennung von Manöverentscheidungen sollte sowohl die Sicherheit des Gesamtsystems aus Fahrer und Fahrzeug als auch die Akzeptanz des Systems vor Kunde verbessern. In einem System, das keine dauerhafte Überwachung durch den Fahrer mehr benötigt, tritt der Sicherheitsaspekt in den Hintergrund. Es ist jedoch anzunehmen, dass ein vorhersehbares Fahrverhalten auch hier für eine höhere Akzeptanz sorgt. Ein Effekt der Bewegungsrückmeldung auf das Blick- bzw. Überwachungsverhalten der Probanden kann leider nicht festgestellt werden. Es wird jedoch vermutet, dass dies unter anderem dem Szenario des Erstkontakts geschuldet ist, wodurch die Probanden unabhängig von der Gestaltungsvariante eine sehr hohe Aufmerksamkeit zeigten.

In weiteren Untersuchungen ist daher vor allem die Wirksamkeit der Bewegungsrückmeldung auch nach längerer automatisierter Fahrt zu validieren. Hier sollte insbesondere auch das Fahrerverhalten bei Fehlentscheidungen der Automation untersucht werden, welche im Rahmen der hier durchgeführten Studien nicht betrachtet werden. Des Weiteren ist ein Ansatz zur Integration vestibulärer Rückmeldung in ein ganzheitliches Konzept zur multimodalen Rückmeldung von Informationen des Automationssystems an den Fahrer zu entwickeln.

Die Sicherstellung von Aufmerksamkeit und Übernahmefähigkeit eines Fahrers, der sich nur noch in der Rolle des Überwachers oder der Rückfallebene befindet, stellt eine der größten Herausforderungen zukünftiger teil- und hochautomatisierter Systeme dar. Das in dieser Arbeit beschriebene Konzept der Bewegungsrückmeldung kann den Fahrer in dieser Rolle unterstützen, jedoch kann es seine Aufmerksamkeit und sein Situations- bzw. Systembewusstsein nicht garantieren. Auch wenn die Probanden in den durchgeführten Studien ein sehr hohes Maß an Aufmerksamkeit an den Tag legten, wird dieses

bei regelmäßiger Nutzung des im Rahmen der Studie eingesetzten Systems in alltäglichen Situationen nicht aufrechtzuerhalten sein. Es verbleiben daher zwei Optionen zur Lösung dieses Problems. Eine ist die technische Weiterentwicklung der Automationsysteme hin zur Vollautomation, welche mit nahezu allen Verkehrssituationen umgehen kann, durch redundante Systeme abgesichert ist und im Notfall in der Lage ist, das Fahrzeug auch ohne die Hilfe des Fahrers in einen risikominimalen Zustand zu überführen. Aufgrund der Vielzahl an komplexen Fahrsituationen, die im Straßenverkehr auftreten können, der damit verbundenen enormen Anforderungen an die maschinelle Situationsinterpretation in Kombination mit der nachwievor begrenzten Wahrnehmungsleistung aktueller Sensorik, wird dieser Schritt zunächst nur im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich und klar strukturierter Umgebung möglich sein.

Die zweite Option ist, alle nur möglichen Maßnahmen zu ergreifen, um den Fahrer trotz Automation noch in die Fahrzeugführung mit einzubeziehen. Nur so kann die Sicherheit des Gesamtsystems aus Fahrer und teilautomatisiertem System höher sein, als die der rein manuellen Fahrzeugführung. Der in dieser Arbeit präsentierte Ansatz stellt eine solche Maßnahme dar. Eine Auswahl weiterer Ansätze zur Einbeziehung des Fahrers wurden bereits in Abschnitt 2.3.4 genannt. Für zukünftige automatisierte Seriensysteme, welche den Fahrer noch als Rückfallebene benötigen, ist daher eine intensive Interaktion mit dem Fahrer sowie eine klare Rückmeldung von Systeminformationen an den Fahrer unabdingbar.

Literaturverzeichnis

- Albert, M., Lange, A., Schmidt, A., Wimmer, M. & Bengler, K. (2015). Automated Driving – Assessment of Interaction Concepts Under Real Driving Conditions. In *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)* (Bd. 3, S. 2832–2839).
- Albert, M., Wimmer, M. & Bengler, K. (2014). Nutzerorientierte Interaktionsgestaltung beim hochautomatisierten Fahren. In *30. VDI-VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit* (Bd. 2223, S. 75–82). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Ardelt, M., Coester, C. & Kaempchen, N. (2012). Highly Automated Driving on Freeways in Real Traffic Using a Probabilistic Framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *13* (4), 1576–1585.
- Ardelt, M. & Waldmann, P. (2011). Hybrides Steuerungs- und Regelungskonzept für das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen. *at - Automatisierungstechnik*, *59* (12), 738–750.
- Arkin, R. C. (2000). *Behavior-based robotics* (3. Aufl.). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Arndt, S. (2010). *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen* (Dissertation). Technische Universität Dresden.
- Auto Bild. (2015). *Audi lässt lenken*. Zugriff am 06.08.2016 auf <http://www.autobild.de/artikel/audi-a7-piloted-driving-concept-mitfahrt-5520156.html>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica*, *19* (6), 775–779.
- Baker, C. R. & Dolan, J. M. (2009). A Case Study in Behavioral Subsystem Engineering for the Urban Challenge. *IEEE/RAS Robotics and Automation Magazine (RAM), Special Issue on Software Engineering in Robotics*, *16* (1), 78–87.
- Bartels, A., Berger, C., Krahn, H. & Rumpe, B. (2009). Qualitätsgesicherte Fahrentscheidungsunterstützung für automatisches Fahren auf Schnellstraßen und Autobahnen. In *10. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*.
- Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J., Othersen, I. & Petermann-Stock, I. (2015). What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation. In *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*.

- Beiker, S. A. (2015). Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz & H. Winner (Hrsg.), *Autonomes Fahren* (S. 197–217). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bellem, H., Schönenberg, T., Krems, J. F. & Schrauf, M. (2016). Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 41, 45–54.
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C. & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6 (4), 6–22.
- Bubb, H. (1977). Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 31 (2), 103–112.
- Bubb, H. (1993). Informationswandel durch das System. In H. Schmidtke & R. Bernotat (Hrsg.), *Ergonomie* (S. 333–390). München: Hanser.
- Bubb, H. (2015a). Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (S. 27–65). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bubb, H. (2015b). Der Mensch als Fahrer. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (S. 67–162). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bubb, H. (2015c). Systemergonomie des Fahrzeugs. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (S. 259–344). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2013). *Straßenverkehrsordnung: StVO*.
- Continental AG. (2015). *Mobilitätsstudie*. Zugriff am 02.07.2017 auf <https://www.continental-corporation.com/de/presse/initiatives-surveys/continental-mobilitaetsstudien/mobilitaetsstudie-2015>
- Cramer, S., Lange, A. & Bengler, K. (2015). Path Planning and Steering Control Concept for a Cooperative Lane Change Maneuver According to the H-Mode Concept. In *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*.
- Daimler AG. (2016). *Unternehmensgeschichte: Benz Patent-Motorwagen: Das erste Automobil (1885 - 1886)*. Zugriff am 02.04.2016 auf <https://www.daimler.com/konzern/tradition/geschichte/1885-1886.html>
- Dambier, M. (2010). *Adaptive Information Flow Control: Recognition and Prediction of Factors Contributing to Driver's Stress* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme* (Dissertation). Technische Universität München.
- Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M. & Bengler, K. (2012). Evaluation of a Contact Analogue Head-Up Display for Highly Automated Driving. In *Advances in Human*

- Aspects of Road and Rail Transportation* (S. 3–12). CRC Press.
- Degani, A. & Heymann, M. (2002). Formal Verification of Human-Automation Interaction. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44 (1), 28–43.
- Dickmanns, E. D., Behringer, R., Dickmanns, D., Hildebrandt, T., Maurer, M., Thomanek, F. & Schiehlen, J. (1994). The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (S. 68–73).
- Didier, M. (2006). *Ein Verfahren zur Messung des Komforts von Abstandsregelsystemen (ACC-Systemen)* (Dissertation). Technische Universität Darmstadt.
- Dietmayer, K., Kirchner, A. & Kämpchen, N. (2005). Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin: Springer.
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27 (2), 183–190.
- Donges, E. (2015). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 17–26). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ebeling, S. & Neubert, E. (2001). Komfort als fachübergreifendes Qualitätsmerkmal von Kraftfahrzeugen. In VDI (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (Bd. 1613, S. 95–114). VDI-Verlag.
- Ehmans, D. (2001). Simulationsmodell des menschlichen Spurwechselverhaltens. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (Bd. 1613). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Ehmans, D. (2002). *Modellierung des taktischen Fahrerhaltens bei Spurwechselvorgängen* (Dissertation). RWTH Aachen.
- Eigel, T. (2010). *Integrierte Längs- und Querverführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung* (Dissertation). Technische Universität Braunschweig.
- Elbanhawi, M., Simic, M. & Jazar, R. (2015). In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7 (3), 4–17.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 32–64.
- Endsley, M. R. & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42 (3), 462–492.
- Engeln, A. & Vratil, B. (2008). Fahrkomfort und Fahrgenuss durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. In J. Schade & A. Engeln (Hrsg.), *Fortschritte der Verkehrspsychologie*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Europäische Kommission. (1998). *European Statement of Principles on Human Machine*

- Interface for In-Vehicle Information and Communication Systems.*
- Färber, B. & Maurer, M. (2005). Nutzer- und Nutzenparameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 47–55).
- Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehning, U. & Gstalter, H. (2001). Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 55 (1), 15–23.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik* (Bd. 1). Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- Festner, M., Baumann, H. & Schramm, D. (2016). Der Einfluss fahrfremder Tätigkeiten und Manöverlängsdynamik auf die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren: Ein Argument für die Adaptivität automatisierter Fahrfunktionen. In *VDI/VW Gemeinschaftstagung "Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit 2016"*. VDI Verlag.
- Flemisch, F. O., Adams, C., Conway, S., Goodrich, K., Palmer, M. & Schutte, P. (2003). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (Nr. NASA/TM—2003-212672).
- Flemisch, F. O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H. & Bruder, R. (2014). Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. *Ergonomics*, 57 (3), 343–360.
- Flemisch, F. O., Griesche, S., Schieben, A., Heesen, M., Kaussner, A., Niemann, J., ... Schoemig, N. (2009). *Deliverable D33.3: Validation of preliminary design by simulation*. Zugriff am 21.05.2013 auf <http://www.haveit-eu.org/displayITM1.asp?ITMID=24&LANG=EN>
- Flemisch, F. O., Winner, H., Bengler, K. & Bruder, R. (2017). Vom autonomen Fahren zur migrationsfähigen, kooperativen Assistenz und Automation. In H. Winner & R. Bruder (Hrsg.), *Mensch und Fahrzeug, (Wie) Wollen wir automatisiert fahren?* (S. 103–113).
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2008). *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)* (Nr. 202). Köln: FGSV-Verlag.
- 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 (IV)*.
- Freyer, J. (2008). *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- Gasser, T. M. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe* (Bd. F 83). Bremerhaven: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.),

- Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 27–54). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gold, C., Damböck, D., Bengler, K. & Lorenz, L. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. In *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme*.
- Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D. & Bengler, K. (2015). Trust in Automation – Before and After the Experience of Take-over Scenarios in a Highly Automated Vehicle. In *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)* (Bd. 3, S. 3025–3032).
- Goldstein, E. B. (Hrsg.). (2008). *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs* (7. Aufl. Aufl.). Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Gonzalez, D., Perez, J., Milanés, V. & Nashashibi, F. (2016). A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 17 (4), 1135–1145.
- Greis, F. (2016). *Mercedes E-Klasse im Test: Der Lenkpilot, der nicht lenken darf*. Zugriff am 03.04.2016 auf <http://www.golem.de/news/mercedes-e-klasse-im-test-der-lenkpilot-der-nicht-lenken-darf-1603-119780.html>
- Griesche, S., Nicolay, E., Assmann, D., Dotzauer, M. & Käthner, D. (2016). Should my car drive as I do? What kind of driving style do drivers prefer for the design of automated driving functions? In *17. Braunschweiger Symposium - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*.
- Guedry, F. E. (1974). Psychophysics of Vestibular Sensation. In H. H. Kornhuber (Hrsg.), *Handbook of Sensory Physiology* (Bd. VI/2, S. 3–154). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Handwerker, H. O. (2005). Allgemeine Sinnesphysiologie. In R. F. Schmidt, F. Lang & G. Thews (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (S. 273–294). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Handwerker, H. O. (2006). Allgemeine Sinnesphysiologie. In R. F. Schmidt, H.-G. Schai-ble & N. Birbaumer (Hrsg.), *Neuro- und Sinnesphysiologie* (S. 182–202). Berlin, Heidelberg: Springer Medizin.
- Heil, T., Lange, A. & Cramer, S. (2016). Adaptive and Efficient Lane Change Path Planning for Automated Vehicles. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 479–484).
- Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (2011). *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Heißing, B., Kudritzki, D., Schindlmaister, R. & Mauter, G. (2000). Menschengerechte Auslegung des dynamischen Verhaltens von PKW. In H. Bubb (Hrsg.), *Ergonomie und Verkehrssicherheit* (S. 1–31). München: Herbert Utz Verlag.
- Hoberock, L. L. (1976). *A Survey of Longitudinal Acceleration Comfort Studies in Ground Transportation Vehicles* (Research Report). University of Texas.
- Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in

- dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54 (4), 509–540.
- Hoc, J.-M., Young, M. S. & Blosseville, J.-M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10 (2), 135–160.
- Hohm, A., Lotz, F., Fochler, O., Lueke, S. & Winner, H. (2014). Automated Driving in Real Traffic: from Current Technical Approaches towards Architectural Perspectives. In *SAE 2014 World Congress & Exhibition*.
- Hörwick, M. & Wimmer, M. (2010). Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme. In *3. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung* (Bd. 22, S. 123–135). Düsseldorf: VDI Verlag.
- IEEE Spektrum. (2014). *Google Is Building Its Own Self-Driving Car Prototypes*. Zugriff am 03.04.2016 auf <http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/google-is-building-selfdriving-car-prototypes>
- iMAR. (2012). *Datenblatt iTraceRT-F400-E*. Zugriff am 08.01.2017 auf http://imar-navigation.de/downloads/TraceRT-F400_de.pdf
- ISO. (2010). *Intelligent transport systems - Adaptive Cruise Control systems - Performance requirements and test procedures* (Nr. 15622).
- Jian, J.-Y., Bisantz, A. M. & Drury, C. G. (2000). Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4 (1), 53–71.
- Jones, D. G. & Endsley, M. R. (2000). Overcoming Representational Errors in Complex Environments. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 42 (3), 367–378.
- Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W.-H. & Deka, L. (2015). Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 416–442.
- Kingma, H. (2005). Thresholds for perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of the otolith function. *BioMed Central*, 5 (1).
- Kleine-Besten, T., Kersken, U., Pöchmüller, W., Schepers, H., Mlasko, T., Behrens, R. & Engelsberg, A. (2015). Navigation und Verkehrstelematik. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 1047–1079). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kolbig, M. & Müller, S. (2013). Mode Awareness im Fahrkontext: Eine theoretische Betrachtung. In E. Brandenburg, L. Doria, A. Gross, T. Günzler & H. Smieszek (Hrsg.), *Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion* (S. 1–8). Berlin: Univ.-Verl. der TU Berlin.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2016). *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2016*. Zugriff am 02.04.2016 auf <http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/>

bestand_node.html

- Kritayakirana, K. & Gerdes, J. C. (2009). Controlling an Autonomous Racing Vehicle: Using Feedforward and Feedback to Control Steering and Speed. In *ASME Dynamic Systems and Control Conference* (S. 173–180).
- Lange, A., Albert, M., Siedersberger, K.-H. & Bengler, K. (2015). Ergonomic Design of the Vehicle Motion in an Automated Driving Car. In *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)* (Bd. 3, S. 2761–2768).
- Lange, A., Maas, M., Albert, M., Siedersberger, K.-H. & Bengler, K. (2014). Automatisiertes Fahren - So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig. In *VDI/VW Gemeinschaftstagung "Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit 2014"* (S. 215–228). VDI Verlag.
- Lee, J.-W. & Litkouhi, B. (2012). A unified framework of the automated lane centering/changing control for motion smoothness adaptation. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 282–287).
- Löper, C., Kelsch, J. & Flemisch, F. (2008). Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. In *9. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*.
- Lutz, L. S. (2016). Automatisiertes Fahren: Änderung des Wiener Übereinkommens tritt im März 2016 in Kraft. *Deutsches Autoreacht (DAR)* (1), 55.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1 (1), 6–21.
- Matthaei, R. (2015). *Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten für Assistenzsysteme und automatisches Fahren in urbaner Umgebung* (Dissertation). Technische Universität Braunschweig.
- Matthaei, R., Reschka, A., Rieken, J., Dierkes, F., Ulbrich, S., Winkle, T. & Maurer, M. (2015). Autonomes Fahren. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 1139–1165). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Maurer, M. (2000). *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. & Winner, H. (Hrsg.). (2015). *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Mayr, R. (2001). *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung: Längs- und Querregelung, Spurwechsel- und Überholmanöver*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Montemerlo, M., Becker, J., Bhat, S., Dahlkamp, H., Dolgov, D., Ettinger, S., ... Thrun, S. (2008). Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 25 (9), 569–597.
- Müller, T. A. (2015). *Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik* (Dissertation). Technische Universität

- München.
- Muragishi, Y., Fukui, K. & Ono, E. (2007). Development of a Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics. *AutoTechnology*, 7 (6), 56–58.
- Nagel, H.-H., Enkelmann, W. & Struck, G. (1995). FhG-Co-driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support. *Mathematical and Computer Modelling*, 22 (4-7), 185–212.
- NHTSA. (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles: National Highway Traffic Safety Administration*.
- Norman, D. A. (1990). The 'Problem' of Automation: Inappropriate Feedback and Interaction, Not 'Over-Automation'. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B: Biological Sciences*, 327 (1241), 585–593.
- Othersen, I. (2016). *Vom Fahrer zum Denker und Teilzeitlenker* (Dissertation). Technische Universität Braunschweig.
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Missuse, Disuse, Abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39 (2), 230–253.
- Pellkofer, M. (2003). *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- Petermann, I. & Schlag, B. (2010). Auswirkungen der Synthese von Assistenz und Automation auf das Fahrer-Fahrzeug-System. In 11. *Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)* (S. 383–403).
- Pöppel, E. (2000). *Grenzen des Bewußtseins: Wie kommen wir zur Zeit, und wie entsteht Wirklichkeit?* (2. Aufl.). Frankfurt am Main: Insel-Verlag.
- Radke, T. (2013). *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 13 (3), 257–266.
- Rauch, S., Aeberhard, M., Ardelt, M. & Kämpchen, N. (2012). Autonomes Fahren auf der Autobahn: Eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In 5. *Tagung Fahrerassistenz*.
- Reschka, A., Rieken, J. & Maurer, M. (2015). Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 913–935). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Robert Bosch GmbH. (2016). *25 Jahre ABS von Bosch*. Zugriff am 02.04.2016 auf <http://www.bosch.com/assets/de/company/innovation/theme03.htm>

- Rodenburg, M., Stassen, H. P. & Maas, A. J. (1981). The Threshold of Perception of Angular Acceleration as a Function of Duration. *Biological cybernetics*, 39 (3), 223–226.
- SAE. (2016). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems* (2016-09 Aufl.) (Nr. J3016).
- Salvucci, D. D. & Liu, A. (2002). The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5 (2), 123–132.
- Sarter, N. B. & Woods, D. D. (1995). How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 5–19.
- Scherer, S., Schubert, D., Dettmann, A., Hartwich, F. & Bullinger, A. C. (2016). Wie will der "Fahrer" automatisiert gefahren werden? Überprüfung verschiedener Fahrstile hinsichtlich des Komfortenerlebens. In *VDI/VW Gemeinschaftstagung "Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit 2016"* (S. 299–310). VDI Verlag.
- Schießl, C. (2009). *Modellierung von Belastung und Beanspruchung im Fahrkontext* (Dissertation). Technische Universität Braunschweig.
- Schimmelpfennig, K. & Nackenhorst, U. (1985). Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 23 (4).
- Schmidt, G., Kiss, M., Babbel, E. & Galla, A. (2008). The Wizard on Wheels: Rapid Prototyping and User Testing of Future Driver Assistance Using Wizard of Oz Technique in a Vehicle. In *FISITA 2008 World Automotive Congress*.
- Schmidt, M. T., Hofmann, U. & Bouzouraa, M. E. (2014). A Novel Goal Oriented Concept for Situation Representation for ADAS and Automated Driving. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 886–893).
- Schmidt, R. F., Lang, F. & Thews, G. (Hrsg.). (2005). *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schmidt, R. F., Schaible, H.-G. & Birbaumer, N. (Hrsg.). (2006). *Neuro- und Sinnesphysiologie* (5. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Medizin.
- Schöggel, P., Schrauf, M., Holzinger, J. & Bogner, E. (2015). Objective assessment of comfort and safety of advanced driver assistance systems. In *ATZ* (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme 1. Internationale ATZ-Fachtagung*.
- Sheridan, T. B. & Verplank, W. L. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators* (Bericht). Massachusetts Institute of Technology.
- Siebert, F. W., Oehl, M., Höger, R. & Pfister, H.-R. (2013). Discomfort in Automated Driving – The Disco-Scale. In *HCI International* (S. 337–341).
- Siedersberger, K.-H. (2003). *Komponenten zur automatisierten Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.

- Sparmann, U. (1978). Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* (263).
- Sporrer, A., Prell, G., Buck, J. & Schaible, S. (1998). Realsimulation von Spurwechselforgängen im Straßenverkehr. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, 36 (3), 69–76.
- Steinhardt, N. & Leinen, S. (2015). Datenfusion für die präzise Lokalisierung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Stiller, C. (2005). Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 1–20). Berlin: Springer.
- Todosiev, E. P. (1963). *The action point model of the driver-vehicle system* (Dissertation). Ohio State University.
- Tölle, W. (1996). *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie.
- Ulbrich, S. & Maurer, M. (2015). Towards Tactical Lane Change Behavior Planning for Automated Vehicles. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 989–995).
- Urmson, C., Anhalt, J., Bagnell, D., Baker, C., Bittner, R., Clark, M. N., ... Ferguson, D. (2008). Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 25 (8), 425–466.
- Utesch, F. (2014). *Unscharfe Warnungen im Kraftfahrzeug: Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme?* (Dissertation). Technische Universität Braunschweig.
- Vaas, R. (2000). *Zeit und Gehirn: Ein Streifzug durch die Dimension unseres Erlebens*. Lexikon der Neurowissenschaft. Zugriff am 22.03.2016 auf <http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/zeit-und-gehirn/14651>
- VDA. (2015). Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. *VDA Magazin*. Zugriff am 18.03.2017 auf <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>
- Volkswagen. (2006). *INVENT Schlussbericht VM2010: Teilprojekt VLA - Verkehrsleistungsassistentz*. Wolfsburg.
- Vollrath, M., Schießl, C., Altmüller, T., Dambier, M. & Kornblum, C. (2005). Erkennung von Fahrmanövern als Indikator für die Belastung des Fahrers. In *Fahrer im 21. Jahrhundert* (S. 103–112). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Wakasugi, T. (2005). A Study on Warning Timing for Lane Change Decision Aid Systems Based on Driver's Lane Change Maneuver. In *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*.

- Walker, G. H., Stanton, N. A. & Young, M. S. (2006). The ironies of vehicle feedback in car design. *Ergonomics*, 49 (2), 161–179.
- Wang, M., Ganjineh, T. & Rojas, R. (2011). Action Annotated Trajectory Generation for Autonomous Maneuvers on Structured Road Networks. In *IEEE International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)* (S. 67–72).
- Werling, M., Ziegler, J., Kammel, S. & Thrun, S. (2010). Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenét Frame. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 987–993).
- Winner, H. (2015). Quo vadis, FAS? In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 1167–1186). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winner, H. & Hakuli, S. (2006). Conduct-by-Wire: Following a New Paradigm for Driving into the Future. In *FISITA World Automotive Congress*.
- Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (Hrsg.). (2015). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winner, H. & Schopper, M. (2015). Adaptive Cruise Control. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 851–891). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Wolf, H. J. (2009). *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen* (Dissertation). Technische Universität München.
- Zeit Online. (2015). *Jack, übernehmen Sie!* Zugriff am 02.04.2016 auf <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-04/autonomes-fahren-audi>
- Zeit Online. (2016). *Gutachter sehen im Tesla-Autopiloten "erhebliche Verkehrsgefährdung"*. Zugriff am 4.1.2017 auf <http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-10/autopilot-tesla-model-s-gutachten-verkehrsministerium-zulassung>
- Zenner, H. P. (2005). Der Gleichgewichtssinn und die Bewegungs- und Lageempfindung des Menschen. In R. F. Schmidt, F. Lang & G. Thews (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (S. 357–366). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Zhang, L., Helander, M. G. & Drury, C. G. (1996). Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38 (3), 377–389.
- Ziegler, J., Bender, P., Schreiber, M., Lathegahn, H., Strauss, T. & Stiller, C. (2014). Making Bertha Drive: An Autonomous Journey on a Historic Route. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6 (2), 8–20.
- Zimmermann, M., Bauer, S., Lutteken, N., Rothkirch, I. M. & Bengler, K. J. (2014). Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving. In *International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)* (S. 227–235).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeitschriftenwerbung amerikanischer Energiefirmen	2
2.1	Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis in Anlehnung an Bubb (2015a)	6
2.2	Drei-Ebenen-Modelle nach Rasmussen (1983) und Donges (1982)	8
2.3	Menschlicher Entscheidungsprozess nach Endsley (1995)	10
2.4	Das Automationssystem im Regelkreis der Fahrzeugführung	11
2.5	Trajektorienplanung relativ zu einer Referenzbahn	18
2.6	Gesamtsystemdarstellung aus Fahrer, Automation und Fahrzeug	21
2.7	Koordinatensystem für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung	32
3.1	Beispiele für die visuelle Darbietung von Informationen des Automations- systems an den Fahrer	45
3.2	Elementare Fahrzeugbewegungen	48
3.3	Beschreibung des Beschleunigungsverlaufs eines Bewegungselements	49
3.4	Zuordnung von Bewegungselementen zu Fahrmanövertransitionen	52
3.5	Auslegungsziel für die Gestaltung überschwelliger Beschleunigungen	54
3.6	Beispiele für die Differenzierung von Bewegungselementen	55
3.7	Zeitreserve des Fahrers bei einer Beschleunigung in der Fahrfahrt	57
3.8	Zeitreserve des Fahrers bei einem fehlerhaften Fahrstreifenwechsel	58
4.1	Funktionale Systemarchitektur	61
4.2	Systemmodell Funktionssteuerung	62
4.3	Systemmodell der Manöverebene	63
4.4	Zustandsautomat der Manöverebene	64
4.5	Schnittstelle zur Trajektorienplanungsebene	65
4.6	Planungsraum und relevante Objekte für definierte Manöverzustände	66
4.7	Verlauf der querführungsrelevanten Zustandsgrößen beim Fahrstreifen- wechselmanöver	67
4.8	Aufeinanderfolgende Planungsschritte bei variabler Referenzbahn	68
4.9	Auswirkung der Längsführungsparameter auf den Annäherungsvorgang	72
4.10	Gesamtsystemübersicht	75
4.11	Integration des Wizards auf Manöverebene	76
5.1	Ergebnisse zum Fahrstil der Probanden	79

5.2	Versuchsgelände und gefahrene Strecke für den Fahrversuch	80
5.3	Querdynamikgrößen in Abhängigkeit von der Fahrstreifenwechselzeit . .	81
5.4	Ergebnisse des Fragebogens zur Akzeptanz spürbarer Fahrzeugbewegungen beim automatisierten Fahren	83
5.5	Verteilung der gewählten Fahrstreifenwechselzeiten im Fahrversuch . . .	84
6.1	Versuchsszenario „Fahrstreifenwechsel nach links aus der Folgefahrt“ . .	90
6.2	Gemessene Beschleunigungen im Stillstand und bei automatisierter Geradeausfahrt mit 120 km/h	93
6.3	Schematischer Entwurf der Beschleunigungsprofile des Fahrstreifenwechselmanövers	96
6.4	Zeitlicher Ablauf eines Fahrstreifenwechselmanövers	98
6.5	AOIs im Sichtbereich des Fahrers	99
6.6	Erfahrung der Probanden (Fahrerassistenz- und Automationssysteme) .	101
6.7	Innenraum des eingesetzten Versuchsfahrzeugs	103
6.8	Zeitlicher Ablauf der Probandenstudie	104
6.9	Gemittelter Querpositionsverlauf für den Fahrstreifenwechsel nach links	107
6.10	Gemittelter Beschleunigungsverlauf für den Fahrstreifenwechsel in der Standardausprägung	108
6.11	Gemittelter Beschleunigungsverlauf für den Fahrstreifenwechsel in der Feedbackausprägung	108
6.12	Häufigkeitsverteilung der Startzeitpunkte für die Vorbereitungsphase der Fahrstreifenwechsel in der Feedbackausprägung	109
6.13	Gemittelter Beschleunigungsverlauf relativ zum Beginn der Vorbereitung des Fahrstreifenwechsels in der Feedbackausprägung	109
6.14	Häufigkeitsverteilung der Fahrstreifenwechselerkennungszeiten über alle Fahrstreifenwechsel	110
6.15	Häufigkeitsverteilung der Differenzen der mittleren Fahrstreifenwechselerkennungszeiten aus Standard- und Feedbackausprägung	111
6.16	AOI-Anteile relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels in der Standardausprägung	112
6.17	AOI-Anteile relativ zum Beginn der Durchführung des Fahrstreifenwechsels in der Feedbackausprägung	112
6.18	Anzahl der AOI-Wechsel	113
6.19	Ergebnis der Befragung zur Vorhersehbarkeit der erlebten Fahrstreifenwechsel	114
6.20	Ergebnis der Befragung zur Dynamik der erlebten Fahrstreifenwechsel .	115
6.21	Gemittelte mentale Beanspruchung über die Fahrzeit	118
A.1	Einstellung der Probanden zum automatisierten Fahren	152
A.2	Ergebnisse zum Fahrstil der Probanden in der zweiten Studie	152

Tabellenverzeichnis

2.1	Hierarchische Strukturierung der Fahraufgabe in verschiedenen Funktionsarchitekturen aus der Literatur	14
2.2	Automationsstufen der BAST nach Gasser (2012)	25
2.3	Detaillierung des Sinnes „Fühlen“ nach R. F. Schmidt et al. (2006)	30
2.4	Sinnessysteme und wahrgenommene fahrrelevante Information	31
2.5	Unterschiedsschwellen für Längsbeschleunigungen nach Müller (2015)	34
2.6	Akzeptanzbereiche der Querdynamik beim Fahrstreifenwechsel	39
2.7	Akzeptanzbereiche der Längsdynamik	40
3.1	Anforderungen an die vestibuläre Rückmeldung	47
3.2	Übersicht zu Manöverkatalogen in der Literatur	50
3.3	Betrachtete Fahrmanöver für die Autobahnfahrt	51
4.1	Parameter zur Anpassung des Querführungsverhaltens der Bahnplanung	69
4.2	Parameter zur Anpassung des Längsführungsverhaltens	71
5.1	Studienübersicht: Akzeptierte Dynamik beim automatisierten Fahren	77
5.2	Fragebogen zur gewünschten Dynamik der Fahrzeugbewegung	82
5.3	Mittelwert, Median, Wertebereich der gewählten Fahrstreifenwechselzeiten im Fahrversuch	85
6.1	Studienübersicht: Bewegungsrückmeldung beim automatisierten Fahren	90
6.2	Erweiterte Parameter zur Anpassung des Querführungsverhaltens der Bahnplanung	92
6.3	Gewählte Parameter für die Längs- und Querbewegung beim Fahrstreifenwechsel in den beiden Gestaltungsvarianten	97
6.4	Antwortmöglichkeiten zur Messung der mentalen Beanspruchung	100
6.5	Überblick über die in der Studie erfassten Fahrstreifenwechselmanöver	106
6.6	Mittelwert, Median, Wertebereich der Fahrstreifenwechselerkennungszeit	111
6.7	Analyse der Antworten in den Freitextfeldern des Fragebogens	116
6.8	Gemessenes Systemvertrauen	117

Abkürzungsverzeichnis

ABS Antiblockiersystem

ACC Adaptive Cruise Control

ADTF Automotive Data and Time triggered Framework

AOI Area of Interest

ASR Antischlupfregelung

BASt Bundesanstalt für Straßenwesen

DGPS Differential Global Positioning System

ESC Elektronische Stabilitätskontrolle

GPS Global Positioning System

HUD Head-Up Display

MMS Mensch-Maschine-Schnittstelle

SAE Society of Automotive Engineers

VDA Verband der Automobilindustrie

Anhang

A.1 Instruktion für Probanden

Teilautomatisiertes Fahren - Realfahrzeugstudie

Instruktion für Versuchspersonen

Herzlich Willkommen zur Realfahrzeugstudie zum teilautomatisierten Fahren auf der Autobahn. Sie haben sich bereit erklärt, als Versuchsperson an dieser Studie teilzunehmen, wofür Ihnen der Lehrstuhl für Ergonomie an der Technischen Universität München und die AUDI AG herzlich danken.

Bitte nehmen Sie sich Zeit die folgenden Hinweise zu lesen, um etwas über den Versuch und dessen Ablauf zu erfahren. Falls während des Lesens der Instruktion oder im Laufe des Versuchs Fragen entstehen, zögern Sie nicht diese Ihrem Versuchsleiter zu stellen.

Wir bitten Sie sich klar zu machen, dass es sich bei dem in diesem Versuch eingesetzten Fahrzeug um einen Prototyp handelt. Das integrierte Automationssystem wurde in Testfahrten erprobt und arbeitet nach unserem Kenntnisstand zuverlässig. Trotzdem ist es dringend erforderlich, dass Sie mit hoher Aufmerksamkeit und Vorsicht an diesem Versuch teilnehmen und Ihnen klar ist, dass ein Fahrfehler des Automationssystems, des umgebenden Verkehrs sowie auch ihrerseits auftreten kann.

Neben den von Ihnen getätigten Angaben in den Fragebögen werden während des Versuchs Messdaten des Fahrzeugs, ein Videobild der Verkehrssituation und ein Portraitvideo sowie Ton im Fahrzeug aufgezeichnet. Die Daten werden ausschließlich für die wissenschaftliche Auswertung im Rahmen des Versuchs verwendet und nicht personenbezogen gespeichert. Die Daten bilden die Grundlage zur Ableitung statistisch evaluierter Ergebnisse, die keine Rückschlüsse auf einzelne Personen zulassen. Des Weiteren steht es Ihnen natürlich frei den Versuch ohne Angaben von Gründen jederzeit abubrechen.

Fahrzeug und Funktionen des teilautomatisierten Assistenzsystems

Das Fahrzeug ist ein Audi A6 Prototyp und Eigentum der AUDI AG. Darin ist ein teilautomatisiertes Assistenzsystem integriert, welches auf Autobahnen selbstständig die Längs- (Bremsen und Beschleunigen) und Querführung (Lenken) des Fahrzeugs ausführen kann. Es fährt mit einer maximalen Geschwindigkeit von 120 km/h und passt diese gegebenenfalls an Geschwindigkeitsbegrenzungen an. Im Falle eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeuges reduziert das System die eigene Geschwindigkeit entsprechend und versucht anschließend einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen, um das langsamere Fahrzeug zu überholen.

Da es sich bei dem getesteten System um ein teilautomatisiertes System handelt, sind Sie jederzeit in der Verantwortung und müssen das System sowie ihr Umfeld dauerhaft überwachen. Insbesondere in folgenden Situationen sollten Sie besonders aufmerksam sein:

- Nahe vor dem eigenen Fahrzeug einscherende Fahrzeuge (z.B. an Autobahnauffahrten)
- Stark verzögernde vorausfahrende Fahrzeuge (das System wird selbstständig keine Notbremsung durchführen)
- Fahrstreifenwechselsituationen
- Seitlich sehr nahe kommende Fahrzeuge

Sie dürfen während der Fahrt keine Nebenaufgaben ausführen und müssen jederzeit bereit sein die Fahraufgabe wieder zu übernehmen. In diesem Fall wird Sie entweder das Fahrzeug selbst oder der Versuchsleiter zur Übernahme auffordern. Folgen Sie dieser Anweisungen bitte augenblicklich!

Falls Sie selbst das Gefühl haben, dass das System einen Fehler macht oder die Situation Ihnen zu gefährlich wird, können Sie das System jederzeit deaktivieren oder übersteuern.

Deaktiviert wird das System durch folgende Bedienhandlungen:

- Drücken des Automationsknopfes (diesen wird Ihnen der Versuchsleiter zeigen)
- Betätigung des Bremspedals
- Betätigung des Gaspedals
- Aufbringung eines größeren Lenkmoments

Die Deaktivierung des System wird Ihnen visuell im Kombi-Instrument des Fahrzeugs sowie akustisch, durch einen Gong zurückgemeldet.

Sollte es vorkommen, dass sich das System durch die oben genannten Bedienhandlungen nicht deaktivieren lässt, kann durch **Betätigung der Hupe eine Notabschaltung ausgelöst werden. Dies ist allerdings nur im Notfall zu tun, da es einen Neustart des gesamten Fahrzeugs notwendig macht.**

Bei der automatischen Durchführung der Fahrstreifenwechselforgänge ist Folgendes zu beachten:

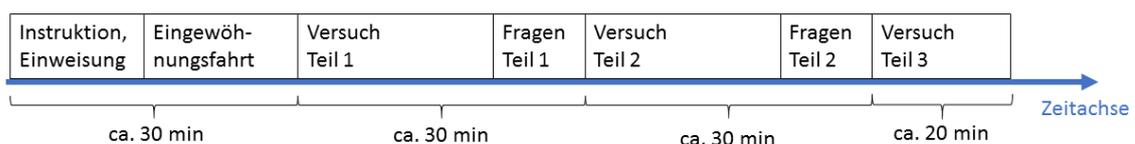
Aufgrund des frühen Entwicklungsstands des Systems wird das Fahrzeug keine „fliegenden“ Fahrstreifenwechselforgänge nach links durchführen. Es wird seine Geschwindigkeit immer erst der Geschwindigkeit des langsameren Vorderfahrzeugs anpassen und anschließend den rückwärtigen Verkehr sorgsam prüfen. Wenn es eine passende Lücke auf dem linken Nachbarfahrstreifen detektiert, beginnt es mit dem Fahrstreifenwechselforgang. Beim Fahrstreifenwechsel nach rechts erfolgt das Manöver aus der freien Fahrt heraus auch ohne Vorhandensein eines Vorderfahrzeugs. Es ist außerdem zu erwähnen, dass **das Fahrzeug während des Fahrstreifenwechsels nur äußerlich sichtbar blinkt**. Das heißt, Sie nehmen selbst kein optisches oder akustisches Blinksignal wahr, obwohl die anderen Verkehrsteilnehmer Ihren Blinker sehen.

Grundsätzlich wird das Fahrzeug je nach Fahrbahnbeschaffenheit und Situation ruhiger oder unruhiger fahren. Unruhiges Fahrverhalten macht sich z.B. durch leicht schwingende Lenkbewegungen bemerkbar. Dies ist an sich kein Grund zur Sorge. Durch Ungenauigkeiten in der Lokalisierung des Fahrzeugs kann es außerdem vorkommen, dass das Fahrzeug zeitweise nicht ganz mittig im Fahrstreifen fährt. Dies ist ebenfalls keine Fehlfunktion.

Sollte Ihnen das Verhalten jedoch zu irgend einem Zeitpunkt zu unsicher werden, dürfen Sie das System jederzeit deaktivieren.

Ablauf des Versuchs

In folgender Abbildung sehen Sie den geplanten Ablauf der Realfahrzeugstudie.



Nach einer Instruktion durch den Versuchsleiter beginnt der Versuch mit einer manuellen Eingewöhnungsfahrt auf der Autobahn. Hier können Sie sich an das Fahrverhalten des Fahrzeugs gewöhnen. Im Anschluss folgt eine automatisierte Eingewöhnungsfahrt, bei der Sie sich an das System und dessen Bedienung gewöhnen können. Danach beginnt der eigentliche Versuch.

Wir führen den Versuch auf der A9 durch und fahren auf dem in folgender Abbildung gekennzeichneten Streckenabschnitt mehrmals auf und ab.



Streckenübersicht

Es werden zwei verschiedene Fahrverhaltensausprägungen des teilautomatisierten Systems getestet. Das bedeutet, in Versuchsteil eins wird eine andere Systemausprägung gefahren als in Versuchsteil zwei. In Versuchsteil drei werden wir Ihnen die Unterschiede der beiden Ausprägungen nochmals vorführen und Ihnen ein paar Fragen dazu stellen.

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Ausführung des Fahrstreifenwechsellvorgangs. Sie erhalten während der Versuchsdurchführung einen **Daumentaster, den Sie bitte immer betätigen, sobald Sie der Meinung sind, dass das Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsellvorgang vorbereitet oder beginnt**. Es ist wichtig, dass Sie den Taster drücken, unmittelbar nachdem Sie bemerken, dass das Auto den Fahrstreifenwechsellvorgang vorbereitet oder mit diesem beginnt.

Zusätzlich wird während der Fahrt regelmäßig ihr **Wohlbefinden abgefragt. Dazu ertönt im Minutentakt ein Signalton** auf den Sie bitte unmittelbar mit einer Zahlenangabe zwischen -2 und +2 antworten. Die Bedeutung der Werte ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

sehr entspannt	entspannt	neutral	beansprucht	sehr beansprucht
-2	-1	0	1	2

Falls Sie noch offene Fragen haben, zögern Sie nicht diese Ihrem Versuchsleiter persönlich noch vor Beginn des Versuchs zu stellen.

Wir bedanken uns bereits im Voraus für Ihre Teilnahme.

A.2 Fragebögen

A.2.1 Fragebogen zur Beurteilung des automatisierten Fahrverhaltens beim Fahrstreifenwechsel

Wie empfanden Sie das Auslenken aus dem Startfahrstreifen beim Fahrstreifenwechsel nach links?

sanft ruckartig

Wie empfanden Sie die Querschleunigung beim Fahrstreifenwechsel nach links?

gering hoch

Bitte bewerten Sie im Folgenden, wie Sie die Durchführung der Fahrstreifenwechsellvorgänge nach links empfunden haben.

überraschend vorhersehbar

unsinnig sinnvoll

künstlich natürlich

unkomfortabel komfortabel

Warum war der Fahrstreifenwechsellvorgang nach links für Sie vorhersehbar oder nicht vorhersehbar?

Welche Aspekte des Fahrstreifenwechsellvorgangs nach links fanden Sie eher künstlich oder eher natürlich?

A.2.2 Fragebogen zum Systemvertrauen

Nachstehend finden Sie eine Liste von Aussagen zur Bewertung von Vertrauen in automatisierte Systeme. Diese Liste umfasst verschiedene Dimensionen, auf denen Sie Ihr Vertrauen bzw. Ihren Eindruck während der Bedienung einer Maschine einschätzen können. Bitte markieren Sie auf der folgenden Skala jeweils die Ausprägung, die Ihr Gefühl oder Ihren Eindruck bezüglich des Systems zum teilautomatisierten Fahren am besten beschreibt.

	überhaupt nicht						außerordentlich
Ich kann dem System vertrauen.	<input type="checkbox"/>						
Das System ist irreführend.	<input type="checkbox"/>						
Das System bietet Sicherheit.	<input type="checkbox"/>						
Die Funktionsweise des Systems ist undurchsichtig.	<input type="checkbox"/>						
Ich misstrau dem Zweck, der Funktionsweise oder der Leistung des Systems.	<input type="checkbox"/>						
Das System ist vertrauenswürdig.	<input type="checkbox"/>						
Ich traue dem System nicht über den Weg.	<input type="checkbox"/>						
Das System ist zuverlässig.	<input type="checkbox"/>						
Das System ist ein verlässlicher Partner.	<input type="checkbox"/>						
Die Funktionsweise des Systems führt zu nachteiligen oder schädlichen Konsequenzen.	<input type="checkbox"/>						
Ich bin vom System überzeugt.	<input type="checkbox"/>						
Ich bin mit dem System vertraut.	<input type="checkbox"/>						

Nach Jian et al. (2000), deutsche Übersetzung nach Gold et al. (2015).

A.3 Instruktion für Wizard

- Die Sollgeschwindigkeit wird auf 120 km/h eingestellt
- Wenn das für den Versuch freigegebene Teilstück erreicht ist und das Fahrzeug sich auf dem rechten Fahrstreifen befindet, wird die Funktion freigeschaltet. Dem Fahrer wird daraufhin im Kombiinstrument eine Anzeige „Autobahnpiilot verfügbar“ angezeigt.
- Der Fahrer kann die Funktion nun selbständig über den Lenkradtaster aktivieren. Bei Aktivierung sieht er eine Anzeige „Autobahnpiilot aktiv“
- Das Fahrzeug fährt selbständig mit maximal 120 km/h im Fahrstreifen und passt seine Geschwindigkeit langsameren vorausfahrenden Fahrzeugen an.
- Fährt das Fahrzeug mit weniger als 100 km/h hinter einem Vorderfahrzeug, so sucht der Wizard unter Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs nach einer geeigneten Lücke für einen Fahrstreifenwechsel nach links.
- Ist eine ausreichend große Lücke in Sicht wird mindestens 2 Sekunden bevor die Lücke neben dem Fahrzeug ist, die Transition in die Vorbereitungsphase freigegeben.
- Sobald die Lücke neben dem Fahrzeug ist, wird die Transition zur Durchführung freigegeben.
- Sollte sich in irgendeinem Moment die Verkehrssituation derart ändern, dass nach Einschätzung des Wizards von einem Fahrstreifenwechselmanöver abzuraten ist, kann er die Transition zum Abbruch des Manövers freigeben.
- Wenn es die Verkehrssituation erlaubt, wird nach dem Fahrstreifenwechsel nach links wieder nach rechts zurück gewechselt. Dabei wird auf eine explizite Präsentation der Vorbereitungsphase verzichtet.
- Bei Erreichen des Endes der für den Versuch freigegebenen Strecke, wird dem Fahrer eine Übernahmeaufforderung angezeigt und die Fahrzeugführung wieder an ihn übergeben.

A.4 Weitere Informationen zum Probandenkollektiv

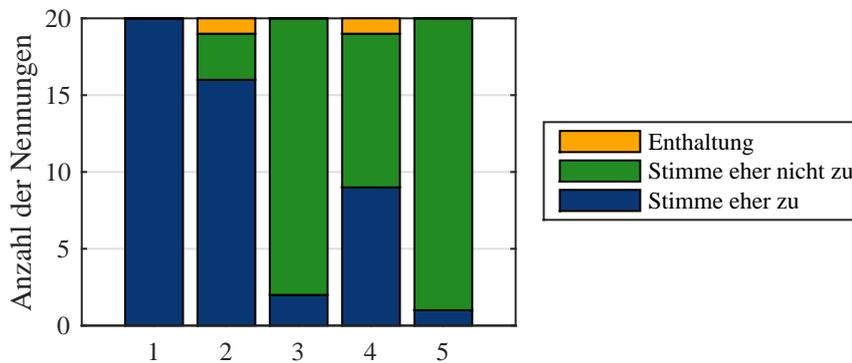


Abbildung A.1: Einstellung der Probanden zum automatisierten Fahren: (1) Automatisiertes Fahren kann mich in monotonen oder stressigen Fahrsituationen entlasten, (2) Automatisiertes Fahren kann schwere Unfälle vermeiden, (3) Ich glaube nicht, dass es jemals zuverlässig funktionieren wird (4) Wenn das Auto selber fährt, kann ich andere Dinge tun (5) Automatisiertes Fahren macht mir Angst (angelehnt an Continental AG, 2015).

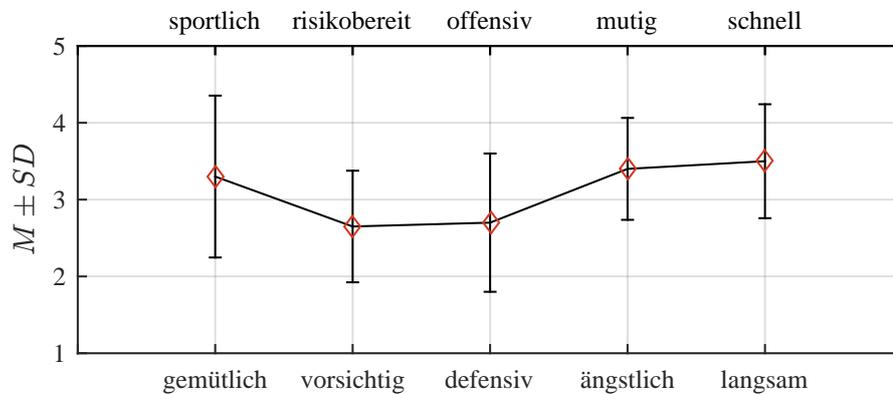


Abbildung A.2: Ergebnisse zum Fahrstil der Probanden in der zweiten Studie („Im Vergleich zu anderen Autofahrern fahre ich überwiegend ...“)