

Regulatives Fahrerverhalten und dessen Relevanz für das automatisierte Fahren

–

**Ausarbeitung und Untersuchung eines Arbeitsmodells zu funktionalen
Verhaltensanpassungen**

Von der Philosophischen Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Philosophie genehmigte
Dissertation

vorgelegt von

Gudrun Mechthild Irmgard Voß

Berichter: apl. Prof. Dr. phil. Maximilian Schwalm
Univ.-Prof. Dr. phil. Jochen Müsseler

Tag der mündlichen Prüfung: 24.06.2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Mein Dank gilt zunächst insbesondere Prof. Dr. phil. Maximilian Schwalm, meinem Doktorvater, für die hervorragende Betreuung auf meinem akademischen Werdegang. Seine jederzeit „offene Tür“, das konstruktive Feedback und die spannenden Diskussionen ermöglichten mir einen reflektierten Zugang zur Thematik meiner Dissertation. Die Gespräche auf fachlicher und persönlicher Ebene waren mir immer eine große Motivation und Unterstützung in meiner Zeit als Doktorandin. Gleichmaßen möchte ich mich bei meinem Zweitberichter Prof. Dr. phil. Jochen Müsseler bedanken, ohne dessen uneingeschränkte Unterstützung diese Doktorarbeit nicht möglich gewesen wäre. Prof. Dr. rer. nat. Astrid Rosenthal-von der Pütten danke ich für das Übernehmen des Vorsitzes im Rahmen meines Promotionsverfahrens.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein und der gesamten Leitung des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University für die Möglichkeit der Anfertigung meiner Dissertation am Institut. Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Kraftfahrzeuge und der fka GmbH danke ich für das überaus kollegiale und produktive Arbeitsumfeld. Hierbei möchte ich besonders den Kolleginnen und Kollegen des Fachbereichs Verkehrspsychologie & Akzeptanz meinen herzlichen Dank für alle hilfreichen Diskussionen und Gedankenanstöße sowie für die vielen schönen Momente aussprechen. Den FaSi-Kollegen und dem Prüfstands-Team des Passat CC gilt mein Dank für die fachliche Unterstützung und Zusammenarbeit. Weiterhin danke ich den Kollegen des Instituts für Straßenwesen für die Möglichkeit der gemeinsamen Arbeit an den Themen meiner Dissertation.

Alessia Bellotto, Nicolas Herzberger, Anna-Lena Köhler sowie Dr. phil. Stefan Ladwig danke ich sehr für ihre Hilfsbereitschaft und ihr detailliertes Feedback. Dr. phil. Melissa Kratschmayr gilt mein besonderer Dank für die zahlreichen fachlichen und persönlichen Gespräche und Tipps während unserer gemeinsamen Zeit als Doktorandinnen.

Nicht vergessen möchte ich die Studierenden, die im Rahmen ihrer Qualifikationsarbeiten bzw. als studentische Hilfskräfte ihren Teil zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben. Mein Dank gilt hier insbesondere Niklas Puller, Malte Rohrbeck, Daniel Swierc, Sophia von Salm-Hoogstraeten, Caroline Keck und Benjamin Heckler sowie Nicola Schneider, Lena Plum, Sophie Würger und Julia Pelzer.

Weiterhin möchte ich mich bei der Bundesanstalt für Straßenwesen für die finanzielle und fachliche Unterstützung bedanken. Die Förderung der Projekte FE 82.0614/2014

und FE 82.0685/2016 war eine der zentralen ermöglichenden Bedingungen für die Realisierung meiner Forschung. Besonders möchte ich Dr. rer. nat. Heike Hoffmann, Roland Schindhelm sowie Alexander Frey meinen Dank für die bereichernde Zusammenarbeit im Rahmen dieser zwei Projekte aussprechen.

Selbstverständlich danke ich ebenfalls herzlich den zahlreichen Teilnehmenden an meinen Studien.

Schließlich gilt mein tiefer Dank meinem Verlobten Jan-Niklas Jünger, der zu jeder Zeit an meiner Seite war, sowie meinen Freunden und meiner Familie. Insbesondere möchte ich von Herzen meinen Eltern Petra Voß und Jürgen Voß, denen ich diese Arbeit widme, danken, dass sie mich auf meinem Lebens- und Bildungsweg jederzeit und bedingungslos unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1. Einleitung	5
1.1. Motivation und Zielsetzung der Arbeit	5
1.1.1. Bearbeitung und Auswirkungen fahrfremder Tätigkeiten.....	5
1.1.2. Idee des regulativen Fahrerverhaltens.	6
1.1.3. Trend des automatisierten Fahrens.	7
1.1.4. Thematik der Arbeit.....	8
1.2. Aufbau der Arbeit.....	9
2. Theoretischer Hintergrund	10
2.1. Fahrfremde Tätigkeiten (FFT).....	10
2.2. Kognitive Fahrerprozesse	11
2.2.1. Belastung und Beanspruchung.	11
2.2.2. Kognitive Ressourcen.....	12
2.2.3. Informationsverarbeitung und Aufgabenwechsel.....	13
2.3. Driver distraction.....	15
2.4. Regulatives Fahrerverhalten	17
2.4.1. Modelle zum regulativen Fahrerverhalten.....	17
2.4.1.1. Situationsbewusstsein.....	18
2.4.1.2. Allgemeines Modell zur Aufgabenregulation.	18
2.4.1.3. Bisherige Modelle zum regulativen Fahrerverhalten.	19
2.4.1.4. Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen.	22
2.4.2. Empirischer Nachweis zum regulativen Fahrerverhalten.....	25
2.4.3. Maßnahmen zur Unterstützung des regulativen Fahrerverhaltens.	28
2.5. Subjektive Fahrleistungsbewertung.....	28
2.5.1. Modelle der subjektiven Fahrleistungsbewertung.....	29
2.5.2. Subjektive Schwellenwerte in der Fahrleistung.	31
2.5.3. Einflussfaktoren auf die subjektive Fahrleistungsbewertung.....	39

2.6. Entwicklung des automatisierten Fahrens	41
2.6.1. Definition des Begriffs der Automatisierung.	42
2.6.2. Klassifikation assistierter und automatisierter Fahrfunktionen.	42
2.6.3. Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten.	45
2.6.3.1. Reduktion des Arousallevels und des Situationsbewusstseins.	45
2.6.3.2. FFT-Bearbeitung im automatisierten Fahren.	46
2.6.3.3. Herausforderung von Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens.	46
2.6.3.4. Idee funktionaler Verhaltensanpassungen in Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens.	48
3. Forschungsgegenstand und wissenschaftliche Fragestellungen	51
3.1. Offene Forschungsfelder	51
3.1.1. Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren.	52
3.1.2. Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsbewertung und deren Relevanz im automatisierten Fahren.	53
3.1.3. Subjektive Fahrleistungsbewertung als Auslöser funktionaler Verhaltensanpassungen und Bedeutung dieses Zusammenhangs für das automatisierte Fahren.	53
3.2. Wissenschaftliche Fragestellungen der aktuellen Arbeit	54
3.2.1. Studie 1.....	55
3.2.2. Studie 2.....	56
3.2.3. Studie 3.....	56
3.2.4. Studie 4.....	57
3.2.5. Studie 5.....	58
3.2.6. Studie 6.....	59
3.3. Definition zentraler Begriffe	60
3.3.1. Fahrleistung.	60
3.3.2. Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung....	60
3.3.3. Funktionale Verhaltensanpassungen.	60

4. Studie 1 – Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation.....	62
4.1. Zielsetzung und Hypothesen	62
4.2. Methode.....	65
4.2.1. Material.....	65
4.2.1.1. Fahrsimulator.....	65
4.2.1.2. Automatisierte Fahrfunktion.	66
4.2.1.3. Fahrszenarien.....	67
4.2.1.4. Fahr fremde Tätigkeit (FFT) – Surrogate Reference Task.....	69
4.2.1.5. Fragebögen.....	70
4.2.2. Design.....	71
4.2.3. Ablauf.....	72
4.2.4. Stichprobe.....	73
4.3. Ergebnisse.....	73
4.3.1. Datenaufbereitung und -überprüfung.....	73
4.3.2. Effekte des AF auf die SuRT-Aktivität im Normalverkehr.....	75
4.3.3. Reduzierung der SuRT-Aktivität nach dem TOR- bzw. Warnsignal.....	76
4.3.4. Analyse der Fahrleistung nach der kritischen Fahrsituation bzw. nach der Übernahme der Fahraufgabe.....	80
4.3.5. Zusammenhang zwischen der SuRT-Aktivität und der Fahrleistung.....	81
4.3.6. Zusammenhang zwischen den Objektiv- und Subjektivdaten.....	82
4.4. Diskussion	83
5. Studie 2 – Untersuchung und Erfassung einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung.....	90
5.1. Zielsetzung und Hypothesen	90
5.2. Generierung einer Attributsammlung zum Konstrukt subjektiv angemessen empfundene Fahrleistung	92
5.2.1. Literaturrecherche.....	92
5.2.1.1. Methode.....	92
5.2.1.2. Ergebnisse.....	93
5.2.2. Online-Studie.....	93

5.2.2.1. Methode.....	94
5.2.2.2. Ergebnisse.	97
5.2.3. Expert Card Sorting.....	97
5.2.3.1. Methode.....	97
5.2.3.2. Ergebnisse.	98
5.3. Generierung des Testmaterials	98
5.3.1. Expertenbefragung.	99
5.3.1.1. Methode.....	99
5.3.1.2. Ergebnisse.	99
5.3.2. Videoaufzeichnungen.....	100
5.3.3. Manipulationscheck.....	101
5.3.3.1. Methode.....	101
5.3.3.2. Ergebnisse.	102
5.4. Finale Itemauswahl und Untersuchung der Faktorenstruktur	103
5.4.1. Methode.....	103
5.4.2. Ergebnisse.	104
5.5. Ableitung einer Messmethodik	106
5.6. Diskussion	107
6. Studie 3 – Bestimmung von Schwellenwerten einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes mit Fokus auf das automatisierte Fahren	111
6.1. Zielsetzung und Hypothese	111
6.2. Methode.....	112
6.3. Ergebnisse	113
6.4. Diskussion	114
7. Studie 4 – Untersuchung des situativen Einflusses auf die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes	118
7.1. Zielsetzung und Hypothese	118

7.2. Methode.....	119
7.2.1. Material und Design.	119
7.2.2. Ablauf.	122
7.2.3. Stichprobe.....	122
7.3. Ergebnisse.....	123
7.3.1. Bewertung der Angemessenheit.	123
7.3.2. Schwellenwertbestimmung einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes.	124
7.3.3. Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen.....	126
7.4. Diskussion	127
8. Studie 5 – Untersuchung der Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen	131
8.1. Zielsetzung und Hypothesen	131
8.2. Vorstudie	134
8.2.1. Methode.....	134
8.2.1.1. Material.....	134
8.2.1.2. Design.....	137
8.2.1.3. Ablauf.....	137
8.2.1.4. Stichprobe.....	138
8.2.2. Ergebnisse.....	138
8.2.3. Diskussion.	138
8.3. Hauptstudie.....	140
8.3.1. Methode.....	140
8.3.1.1. Material.....	141
8.3.1.2. Design.....	144
8.3.1.3. Ablauf.....	144
8.3.1.4. Stichprobe.....	145
8.3.2. Ergebnisse.....	146
8.3.2.1. Wahrnehmung des Gegenverkehrs und Angemessenheit der Ego- Trajektorie.	146

8.3.2.2. Subjektiv berichtete Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung.	147
8.3.2.3. Komfort-Sicherheits-Skala.	148
8.3.2.4. Offene Kommentare.	149
8.3.2.5. Aufbereitung der Objektivdaten.	150
8.3.2.6. SuRT-Aktivität.	151
8.3.2.7. Geschwindigkeit.	154
8.3.2.8. Lateralversatz.	157
8.3.2.9. Vergleich der drei Objektivparameter.	160
8.3.3. Diskussion.	161
9. Studie 6 – Konfirmatorische Überprüfung der bestimmten Schwellenwerte und deren Handlungsrelevanz im Sinne funktionaler Verhaltensanpassungen im Realversuch.	167
9.1. Zielsetzung und Hypothesen.	167
9.2. Methode.	168
9.2.1. Material.	169
9.2.1.1. Strecke.	169
9.2.1.2. Versuchsfahrzeug und automatisierte Fahrfunktion.	170
9.2.1.3. Gegenverkehrsszenarien.	171
9.2.1.4. FFT.	173
9.2.1.5. Fragebögen.	173
9.2.2. Design.	174
9.2.3. Ablauf.	175
9.2.4. Stichprobe.	177
9.3. Ergebnisse.	178
9.3.1. Verifikation der Schwellenwerte (Studienteil 1).	178
9.3.1.1. Angemessenheit der Ego-Trajektorie.	178
9.3.1.2. Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung.	179
9.3.1.3. Komfort-Sicherheits-Skala.	179
9.3.2. Überprüfung der Handlungsrelevanz (Studienteil 2).	180
9.3.2.1. Wahrnehmung des Gegenverkehrs und Angemessenheit der Ego-Trajektorie.	181

9.3.2.2. Subjektiv berichtete Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung.....	182
9.3.2.3. Komfort-Sicherheits-Skala.....	182
9.3.2.4. Offene Kommentare.....	184
9.3.2.5. Aufbereitung der Objektivdaten.....	185
9.3.2.6. SuRT-Aktivität.....	187
9.3.2.7. Geschwindigkeit.....	189
9.3.2.8. Lateralversatz.....	192
9.3.2.9. Vergleich der drei Objektivparameter.....	195
9.4. Diskussion.....	196
10. Generelle Diskussion.....	203
10.1. Überblick empirische Studien und Bedeutung der Ergebnisse für die Zielsetzung der Arbeit.....	204
10.1.1. Funktionale Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die Situationswahrnehmung und -antizipation im automatisierten Fahren.....	204
10.1.2. Subjektive Fahrleistungsbewertung.....	205
10.1.3. Funktionale Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die subjektive Fahrleistungsbewertung im automatisierten Fahren.....	207
10.1.4. Fazit.....	209
10.2. Kritische Reflexion der Forschungsmethodik.....	210
11. Implikationen und Ausblick.....	213
11.1. Fortführende Analyse der in der Dissertation untersuchten Komponenten des Arbeitsmodells.....	213
11.2. Untersuchung weiterer Komponenten des Arbeitsmodells.....	214
11.3. Gestaltung automatisierter Systeme bzw. Systemkomponenten.....	215
11.3.1. HMI-Gestaltung und adaptive Trajektorienmechanismen.....	216
11.3.2. Gestaltung von Übernahmen.....	217
Literaturverzeichnis.....	219
Anhang.....	238

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Übertragung des Ansatzes von Hilburn und Jorna (2001) auf den automobilen Kontext (entnommen aus Schwalm, 2009, S. 25).....	12
Abbildung 2. Ressourcenmodell nach Wickens (entnommen aus Wickens, 2008, S. 450).....	13
Abbildung 3. Risikohomöostase-Modell (entnommen aus Wilde, 1982, S. 212)	20
Abbildung 4. Weiterentwickelte Version des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015).....	23
Abbildung 5. Fields of safe travel (entnommen aus Gibson & Crooks, 1938, S. 455) ..	38
Abbildung 6. Zonen der Fahrzeugführung (entnommen aus Bärghman et al., 2015, S. 171)	39
Abbildung 7. Hypothetischer Ablauf der funktionalen Verhaltensanpassungen in Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens nach Voß und Schwalm (2015)....	44
Abbildung 8. Reduziertes Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen mit Hervorhebungen der in den Studien der Arbeit untersuchten Komponenten.....	55
Abbildung 9. (a) Anzeigen der Systemzustände der automatisierten Fahrfunktion der Studie 1. Links = verfügbar; Mitte = aktiv; rechts = Übernahme. (b) Positionierung der Anzeigen im Instrumenten-Kombi.	66
Abbildung 10. Schematische Darstellung einer Versuchsfahrt inkl. der kritischen Rechtskurve der Studie 1 (nach Josten et al., 2016).	69
Abbildung 11. Aufbau und Anzeige der SuRT in Studie 1	70
Abbildung 12. Schematische Darstellung des Studiendesigns der Studie 1	71
Abbildung 13. Mittelwerte der FFT-Aktivität (SuRT-Inputs) während der Staufahrt (Normalverkehr) der Studie 1.	75
Abbildung 14. SuRT-Aktivität im Rahmen der kritischen Fahrsituation/Übernahmesituation über alle Versuchsfahrten für (a) Signal no, (b) Signal low und (c) Signal high in Studie 1.	77

Abbildung 15. SuRT-Aktivität im Rahmen der kritischen Fahrsituation/Übernahmesituation in der ersten Versuchsfahrt für (a) Signal no, (b) Signal low und (c) Signal high in Studie 1.	79
Abbildung 16. Fahrleistung in der kritischen Fahrsituation/der Übernahmesituation in Studie 1.....	81
Abbildung 17. Subjektivbewertung der Übernahmeleistung (Schnelligkeit der fahrerseitigen Übernahme nach Systemdeaktivierung) in Studie 1.	83
Abbildung 18. Vierstufige Methodenabfolge der Studie 2	91
Abbildung 19. Screenshot des im Rahmen der Dissertation entwickelten Java-Tools zur Manipulation von Fahrzeug- und Umgebungsfaktoren in der Simulationssoftware Silab 4.0 (WIVW GmbH, Veitshöchheim, Germany)	95
Abbildung 20. Wetterbedingungen der Fahrleistungsvideos der Online-Studie der Studie 2.....	95
Abbildung 21. Aufbau und Szenario der gefilmten Fahrsituation in Studie 2.....	101
Abbildung 22. Schematische Darstellung des Zwischensubjekt-Faktors Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte in Studie 4.....	120
Abbildung 23. Spezifische Fahrszenarien der Studie 4.....	121
Abbildung 24. Komfort-Sicherheits-Skala.....	121
Abbildung 25. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung pro Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs und des Fahrszenarios in Studie 4.....	124
Abbildung 26. Zusammenhang zwischen der Angemessenheitsbewertung und der Komfort-Sicherheits-Skala in Studie 4	127
Abbildung 27. Zusammenhang zwischen dem Eingriffswunsch und der Komfort-Sicherheits-Skala in Studie 4	127
Abbildung 28. Simulationsumgebung des statischen Fahrstimulators am ISAC (Bildquelle: ISAC)	135
Abbildung 29. Fahrszenario des Simulatorversuchs in Studie 5 im Fahrstimulator des ISAC (Bildquelle: ISAC)	136

Abbildung 30. Position des Ego-Fahrzeugs und des Gegenverkehrs im Simulatorversuch der Studie 5	136
Abbildung 31. Schematische Darstellung des Gegenverkehrsszenarios Abstand -0.15 m + Baken in der Hauptstudie der Studie 5.....	141
Abbildung 32. Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5 im Fahrsimulator des ISAC (Bildquelle: ISAC).	142
Abbildung 33. Chronologie der Experimentalfahrt der Hauptstudie der Studie 5	145
Abbildung 34. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung in den vier Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5	147
Abbildung 35. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala in den vier Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5	148
Abbildung 36. Intervallskalierter zeitlicher Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignisse bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h in der Hauptstudie der Studie 5.....	151
Abbildung 37. SuRT-Inputs in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5.	152
Abbildung 38. Geschwindigkeitsverlauf in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5.....	154
Abbildung 39. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5	156
Abbildung 40. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5	156
Abbildung 41. Lateralversatz in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5.....	158
Abbildung 42. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5	159

Abbildung 43. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5	159
Abbildung 44. Teststrecke des ika	169
Abbildung 45. Streckenverlauf der Realstudie (Studie 6)	169
Abbildung 46. Symbole (Tempomat und Spurhaltung) im Instrumenten-Kombi bei aktiver automatisierter Fahrfunktion in der Realstudie (Studie 6).....	171
Abbildung 47. Gegenverkehrsszenarien der Realstudie (Studie 6)	172
Abbildung 48. Schematische Darstellung der Gegenverkehrsszenarien der Realstudie (Studie 6).....	172
Abbildung 49. Aufbau der SuRT im Versuchsfahrzeug in der Realstudie (Studie 6) ..	173
Abbildung 50. Schematische Darstellung des Innersubjekt-Faktors Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs im Gegenverkehrsszenario des Studienteils 1 der Realstudie (Studie 6)	175
Abbildung 51. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung der Ego-Trajektorie pro Lateralversatz im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6).....	178
Abbildung 52. Prozentuale Verteilung des Eingriffswunschs in die automatisierte Fahrzeugführung pro Lateralversatz im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6).....	179
Abbildung 53. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala pro Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6).....	180
Abbildung 54. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung in den drei Gegenverkehrsszenarien des Studienteils 2 der Realstudie (Studie 6).	182
Abbildung 55. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala in den drei Gegenverkehrsszenarien des Studienteils 2 der Realstudie (Studie 6).	183
Abbildung 56. Intervallskalierter zeitlicher Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignisse bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	187
Abbildung 57. SuRT-Inputs in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das	

Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	188
Abbildung 58. Geschwindigkeitsverlauf in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	190
Abbildung 59. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	192
Abbildung 60. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	192
Abbildung 61. Lateralversatz in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)	193
Abbildung 62. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	195
Abbildung 63. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	195

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht verschiedener Modelle und Erklärungsansätze zur subjektiven Fahrleistungswertung	29
Tabelle 2 Empirische Studien zur lateralen Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsschwellen bzw. einer bevorzugten Trajektorie	34
Tabelle 3 Empirische Studien zur longitudinalen Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsschwellen bzw. einer bevorzugten Trajektorie	36
Tabelle 4 Automatisierungslevel (nach Eckstein, 2014; Gasser et al., 2012; NHTSA, 2013; SAE International, 2018)	43
Tabelle 5 Varianten des akustischen Warnsignals beim TOR-Signal des Staupiloten der Studie 1	67
Tabelle 6 Haupteffekte der zweifaktoriellen ANOVA pro Zeitpunkt für die SuRT-Inputs in Studie 1	78
Tabelle 7 Paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) der SuRT-Aktivität zwischen den zwei Fahrtypen (NF, AF) pro Zeitpunkt und Signal-Gruppe in Studie 1.....	78
Tabelle 8 Korrelation zwischen SuRT-Aktivität und Fahrleistung pro Fahrtyp und Signal-Gruppe in Studie 1	82
Tabelle 9 Cluster schlechter Fahrleistung in Studie 2.....	100
Tabelle 10 Ausgewählte Kriterien für die Fahrmanöver in den Videosequenzen in Studie 2.....	100
Tabelle 11 Deskriptiv- und Inferenzstatistik des Manipulationschecks des Videomaterials der Studie 2	103
Tabelle 12 Extrahierte Items zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung inklusive dem standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten sowie den Faktorladungen der explorativen Faktorenanalyse in Studie 2	105
Tabelle 13 Zuordnung bestehender Faktorenkonstrukte der subjektiven Fahrleistungsbewertung zu den semantischen Kategorien „Komfort & Gefallen“ sowie „Sicherheit & Kontrolle“	109

Tabelle 14 Demografie der Versuchspersonen in den neun Fragebogenversionen der Studie 4	123
Tabelle 15 Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs sowie die Ergebnisse der Komfort-Sicherheits-Skala am Schwellenwert in Studie 4	125
Tabelle 16 Subjektivbewertungen in der Vorstudie der Studie 5	138
Tabelle 17 Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Geschwindigkeit in der Hauptstudie der Studie 5.....	155
Tabelle 18 Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Lateralversatz in der Hauptstudie der Studie 5.....	158
Tabelle 19 Anpassung der Lateralposition des Ego-Fahrzeugs sowie der Position der Pylonen in der Realstudie (Studie 6)	172
Tabelle 20 Ausprägungen des Innersubjekt-Faktors Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6).....	174
Tabelle 21 Fallzahlen vor Ausschluss (d. h. Fälle in der Subjektivauswertung) in der Realstudie (Studie 6).....	186
Tabelle 22 Fallzahlen nach Ausschluss (d. h. Fälle in der Objektivauswertung) in der Realstudie (Studie 6).....	186
Tabelle 23 Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Geschwindigkeit im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6).....	190
Tabelle 24 Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Lateralversatz im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)	193
Tabelle 25 Kriterien schlechter Längsführung (sortiert nach Häufigkeit) gemäß Studie 2	246
Tabelle 26 Kriterien schlechter Querführung (sortiert nach Häufigkeit) gemäß Studie 2	247
Tabelle 27 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei Eingriff (n = 1) in der Hauptstudie der Studie 5.....	248

Tabelle 28 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff (n = 59) in der Hauptstudie der Studie 5	248
Tabelle 29 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.35 m bei Eingriff (n = 1) in der Hauptstudie der Studie 5	249
Tabelle 30 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.35 m bei keinem Eingriff (n = 59) in der Hauptstudie der Studie 5	249
Tabelle 31 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff (n = 29) in der Hauptstudie der Studie 5	250
Tabelle 32 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei keinem Eingriff (n = 29) in der Hauptstudie der Studie 5	251
Tabelle 33 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff (n = 35) in der Hauptstudie der Studie 5	252
Tabelle 34 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei keinem Eingriff (n = 21) in der Hauptstudie der Studie 5	253
Tabelle 35 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei Eingriff (n = 1) in Studie 6.....	254
Tabelle 36 Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff (n = 28) in Studie 6.....	254
Tabelle 37 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff (n = 10) in Studie 6.....	255
Tabelle 38 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei keinem Eingriff (n = 4) in Studie 6.....	255
Tabelle 39 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff (n = 10) in Studie 6.....	256
Tabelle 40 Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei keinem Eingriff (n = 5) in Studie 6.....	256

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
&	und
”	Zoll (Maßeinheit)
<	Kleiner
=	Gleich
>	Größer
≤	kleiner gleich
≥	größer gleich
°	Grad
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
AF	automatisiertes Fahren
ANOVA	analysis of variance (Varianzanalyse)
AV	abhängige Variable
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
bzw.	beziehungsweise
c	Kennwert der kanonischen Korrelation
ca.	circa
cm	Zentimeter
CZB	comfort zone boundary
d	Cohen's d (Maß der Effektstärke)
d. h.	das heißt
dB(A)	bewerteter Schalldruckpegel
dBFS	decibels relative to full scale
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN IEC	Normklassifizierung
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera
F	F-Wert der ANOVA
FE	Förderkennzeichen der BAST
FFT	fahrfremde Tätigkeit
GHz	Gigahertz

GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co. KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
h	Stunde
H	Hypothese
Hrsg.	Herausgeber
Hz	Hertz (Einheit der Frequenz)
IEC	International Electrotechnical Commission
ika	Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University
inkl.	inklusive
ISAC	Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen University
Kfz	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kW	Kilowatt
LCD	liquid crystal display
LED	light-emitting diode
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
M	Mittelwert
M Dev	mean deviation (mittlere Spurabweichung)
min	Minute
ms	Millisekunde
N	Anzahl (Gesamt)
n	Anzahl (Teil von N)
n. s.	nicht signifikant
NDS	naturalistic driving study
NF	nicht-automatisiertes Fahren
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
p	Signifikanzwert eines statistischen Tests
PKW	Personenkraftwagen
PS	Pferdestärke

px	Pixel
r	Kennwert der Korrelation
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
s	Sekunde
s.	siehe
S.	Seite
s. u.	siehe unten
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	standard deviation (Standardabweichung)
Sig.	Signifikanz
StVO	Straßenverkehrsordnung
SuRT	Surrogate Reference Task
t	t-Wert des T-Tests
THW	time-head-way
t_i	Zeitliches Intervall der Objektivdatenauswertung
TLC	time to linecrossing
TOR	takeover request (Übernahmeaufforderung)
TTC	time to collision
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UV	unabhängige Variable
vgl.	vergleiche
VP	Versuchsperson
vs.	versus
WIVW	Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
z. B.	zum Beispiel
η^2	Eta-Quadrat (Maß der Effektgröße)
η_p^2	partielltes Eta-Quadrat (Maß der Effektgröße)
Λ	Wilk's Lambda
X^2	Chi-Quadrat

Zusammenfassung

Individuelle Mobilität ist ein zentrales Thema menschlicher Gesellschaften. In diesem Kontext entwickelte sich der PKW zum primären Fortbewegungsmittel. Die Ausführung der Fahraufgabe stellt in diesem für Fahrerinnen und Fahrer bereits eine hohe Belastung dar. Trotzdem bearbeiten sie oft zusätzliche fahrfremde Tätigkeiten (FFT). Aufgrund der begrenzten menschlichen Kognitionsressourcen kann diese parallele Bearbeitung mehrerer Aufgaben zu Fahrerablenkung führen. Allerdings sind Menschen relativ zu den gefahrenen Kilometern selten in schwere Unfälle verwickelt. Dies legt nahe, dass sie Fähigkeiten zur Unfallvermeidung besitzen. Hierzu konnte Forschung im Kontext des nicht-automatisierten Fahrens zeigen, dass Fahrerinnen und Fahrer ausgehend von ihrem Situationsbewusstsein in Erwartung einer kritischen Fahrsituation bzw. Fahrleistung proaktiv ihre (kognitiven) Ressourcen regulieren und von FFT auf die Fahraufgabe verschieben. Verschiedene theoretische Modelle beschäftigten sich mit diesem regulativen Fahrerverhalten. Aufbauend auf diesen stammt ein ganzheitliches Arbeitsmodell von Schwalm, Voß und Ladwig (2015; Voß & Schwalm, 2015), welches das regulative Fahrerverhalten als funktionale Verhaltensanpassungen konzeptualisiert.

Während Fahrerinnen und Fahrer im nicht-automatisierten Fahren für die sichere Ausführung und Überwachung der Fahraufgabe zuständig sind, ist eine solche dauerhafte Involvierung im automatisierten Fahren je nach Automationsgrad nicht mehr erforderlich. Fahrerinnen und Fahrer können sich mit FFT beschäftigen (ab SAE Level 3) und das Situationsbewusstsein der Fahrerinnen und Fahrer sinkt ab. Dennoch dürfen sie jederzeit in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen bzw. werden bis zu einem bestimmten Automationsgrad sogar als Rückfallebene benötigt (bis SAE Level 3). Aus dieser Kombination eines reduzierten Situationsbewusstseins und den möglichen Fahrerereignissen im automatisierten Fahren ergibt sich die Frage, wie Fahrerinnen und Fahrer es schaffen, in solchen Situationen eine sichere Fahrleistung zu gewährleisten und ob sie zu diesem Zweck auch hier auf die funktionalen Verhaltensanpassungen zurückgreifen können. Die vorliegende Dissertation nimmt sich dieser Thematik an. Es wird die Zielsetzung (a) der theoriebasierten und empirischen Ausarbeitung ausgewählter Komponenten des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) als theoretischer Referenzrahmen der Dissertation sowie (b) der spezifischen Untersuchung der Verfügbarkeit und Ausprägung derselben im Rahmen des automatisierten Fahrens verfolgt.

Hierzu wurde das Arbeitsmodell zunächst theoriebasiert detailliert. Es wurde herausgearbeitet, dass die funktionalen Verhaltensanpassungen im Mehrfachaufgabenkontext vor allem in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung sowie der subjektiven Fahrleistungsbewertung auftreten. Anschließend wurden Annahmen zur Funktionsweise der funktionalen Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren getroffen. Es wurde postuliert, dass Fahrerinnen und Fahrer im Falle von Übernahmen proaktiv die Bearbeitung von FFT zur Freigabe kognitiver Ressourcen reduzieren, welche anschließend für das sichere Lösen der Fahraufgabe genutzt werden.

Diese Annahmen wurden anschließend empirisch geprüft. In einer Fahrsimulationsstudie (Studie 1) wurden die funktionalen Verhaltensanpassungen in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung in einer sich verändernden Fahrsituation (Übernahmesituation vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren) untersucht. Es zeigte sich, dass Fahrerinnen und Fahrer gemäß den theoretischen Annahmen vor einer Übernahme proaktiv die FFT reduzierten, hierüber kognitive Ressourcen freigaben und somit eine sichere Übernahme ermöglichten. Die folgenden Studien untersuchten die Idee, dass solche funktionalen Verhaltensanpassungen ebenfalls bei Abweichungen von subjektiv akzeptierten Trajektorien auftreten können. Zunächst wurde das Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung diskriminanz- und faktorenanalytisch geprüft (Studie 2) und Schwellenwerte subjektiv akzeptierter Fahrleistungen hinsichtlich des Lateralversatzes in Abhängigkeit diverser Personen- und Situationsfaktoren bestimmt (Studien 3 und 4). Anschließend wurde in den Studien 5 und 6 die Handlungsrelevanz der Fahrleistungsschwellen im Mehrfachaufgabenkontext des automatisierten Fahrens im Fahrimulator und unter Realbedingungen auf einer Teststrecke untersucht. Bei Überschreitungen der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zeigten sich dort nicht nur Komforteinbußen, sondern auch die erwarteten funktionalen Verhaltensanpassungen. Im Anschluss an eine proaktive Reduktion der FFT griffen Fahrerinnen und Fahrer vermehrt in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Die Eingriffe waren teilweise allerdings nicht optimal bzw. sogar sicherheitskritisch.

Die Erkenntnisse der sechs empirischen Studien erlaubten abschließend Schlussfolgerungen zu der Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren. Weiterhin wurde zukünftiger Forschungsbedarf, wie die fortführende Modellvalidierung oder die konkrete Gestaltung automatisierter Systeme zur Unterstützung der funktionalen Verhaltensanpassungen, identifiziert.

Abstract

Individual mobility is a central theme of human societies. In this context, the car has become the primary means of transport in which the execution of the driving task already constitutes a high task load for drivers. Nevertheless, they often work on non-driving related tasks. Due to the limited human cognitive resources, this parallel processing of multiple tasks can lead to driver distraction. Yet, people are rarely involved in serious accidents relative to the kilometres driven. Drivers thus seem to have abilities for the avoidance of accidents. Research in the context of non-automated driving can support this claim. Studies could show that drivers – based on their situation awareness – proactively regulate their (cognitive) resources and shift them from the non-driving related tasks to the driving task in case they expect a critical driving situation or driving performance. Various theoretical models dealt with this regulative driver behaviour. Based on these, a holistic working model originates from Schwalm, Voß and Ladwig (2015; Voß & Schwalm, 2015). It conceptualises this regulative driver behaviour as functional behavioural adaptations.

While in non-automated driving drivers are responsible for the safe execution and monitoring of the driving task, in automated driving such a permanent involvement in the driving task is no longer necessary, depending on the degree of automation. Drivers can work on non-driving related tasks (from SAE Level 3 on) and drivers' situation awareness decreases. However, they are allowed to intervene into the automated vehicle guidance at any time or are even required as fall-back option up to a certain degree of automation (until SAE Level 3). This combination of a reduced situation awareness and possible driver interventions in automated driving raises the question of how drivers guarantee a safe driving performance in such situations and whether they can make use of functional behavioural adaptations. This doctoral thesis deals with this topic. The objectives are (a) the theory-based and empirical elaboration of selected components of the working model regarding functional behavioural adaptations from Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) as theoretical frame of reference of this doctoral thesis, and (b) the specific investigation of the availability and characteristics of these in the context of automated driving.

For this purpose, the working model was detailed theory-based. It was highlighted that the functional behavioural adaptations in the multitasking context particularly occur depending on the perception of a situation and depending on the subjective evaluation

of a driving performance. Following, assumptions were made on how functional behavioural adaptations work in the context of automated driving. It was postulated that in case of takeovers, driver proactively reduce activity in non-driving related tasks to release cognitive resources, which subsequently are used for the safe execution of the driving task.

These assumptions were empirically assessed. In a driving simulation study (study 1), the functional behavioural adaptations were examined as a function of the perception of a changing driving situation (takeover from automated to non-automated driving). According to the theoretical assumptions, drivers proactively reduced the processing of a non-driving related task before a takeover, released cognitive resources, and thus enabled a safe takeover. The following studies investigated the idea that such functional behavioural adaptations can also occur in case of deviations from a subjectively accepted trajectory. Initially, the construct of a subjectively accepted driving performance was examined by means of discriminant function and factor analysis (study 2). Thresholds of such a subjectively accepted driving performance regarding the lateral offset as a function of various personal and situational factors were examined (studies 3 and 4). Subsequently, studies 5 and 6 investigated the relevance for action of the thresholds in the multitasking context of automated driving in a simulator and under real conditions on a test track. In case the thresholds were exceeded, not only comfort losses but also the expected functional behavioural adaptations occurred. After a proactive reduction of the non-driving related task, drivers often intervened in the automated vehicle guidance. Some of the interventions, however, were not optimal or even safety critical.

These insights of the six empirical studies allowed for conclusions regarding the availability of functional behavioural adaptations in the context of automated driving. Furthermore, future research needs were identified, for example a continued working model validation or the design of automated systems which support the functional behavioural adaptations.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Die Motive der (Personen-) Beförderung und Fortbewegung waren schon immer zentrale Themen menschlicher Gesellschaften. In diesem Zusammenhang zeigte sich, dass individuelle, zeiteffiziente und sichere Fortbewegung für Menschen moderner Gesellschaften von wesentlichem Interesse ist. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Automobilindustrie große Anstrengungen unternehmen, diese Bedürfnisse zu befriedigen und sich kontinuierlich neuen Herausforderungen annehmen. Mit Blick auf aktuelle Statistiken wird dabei deutlich, dass diese Bemühungen vor allem hinsichtlich der individuellen Mobilität erfolgreich waren (s. auch Keck, 2016). Heutzutage werden 55 % aller absolvierten Strecken mit dem PKW bewältigt (Hütter, 2013). Dies bestätigt auch der Blick auf die Zahlen des aktuellen Fahrzeugbestands, der sich seit den 1980er Jahren verdoppelte. Gemäß aktuellen Zahlen gibt es ca. 55 Million registrierte Fahrzeuge in Deutschland, wobei der PKW als primäres Transportmittel geführt wird (Statistisches Bundesamt, 2016). Kühn und Hannawald (2015) fassten diese Entwicklungen als „Megatrend Individualverkehr“ (S. 58) zusammen.

Im Zuge dieses Trends zeigen sich bestimmte, für die Verkehrssicherheit potenziell relevante Fahrerverhaltensweisen (die Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten, s. Kapitel 1.1.1 und das regulative Fahrerverhalten, s. Kapitel 1.1.2) bzw. deuten sich zukünftige Entwicklungen in der Automobilbranche (automatisiertes Fahren, s. Kapitel 1.1.3) an. Auf diese wird in den folgenden Abschnitten jeweils näher eingegangen und ausgehend hiervon die Thematik der vorliegenden Arbeit spezifiziert (s. Kapitel 1.1.4).

1.1.1. Bearbeitung und Auswirkungen fahrfremder Tätigkeiten. Wie erwähnt, verbringen Menschen der heutigen Gesellschaft viel Zeit in ihrem PKW. Während sie auf den Straßen unterwegs sind, scheinen Fahrerinnen und Fahrer sich dabei in mehr als der Hälfte der Fahrzeit mit zusätzlichen, oft nicht-fahrbezogenen Aufgaben zu beschäftigen (Dingus et al., 2006). Diese Aufgaben werden oft auch als fahrfremde Tätigkeiten (FFT) bezeichnet. Eine Vielzahl von Untersuchungen generierte bereits Übersichten über die normalerweise auftretenden Kategorien von FFT (z. B. Dingus et al., 2006; Huemer & Vollrath, 2012). U. a. identifizierten diese Studien Kategorien wie

Essen/Trinken, Rauchen, Benutzung (nicht-) fahrbezogener Geräte oder Interaktionen mit Mitfahrenden.

Ausgehend von der Tatsache, dass die menschlichen Kognitionsressourcen begrenzt sind und die parallele Bearbeitung mehrerer Aufgaben deshalb zu Fehlern führen kann (Kahneman, 1973; Wickens, 2008), werden die negativen Auswirkungen dieses Mehrfachaufgabenverhaltens auf die Leistungsfähigkeit von Fahrerinnen und Fahrern unter dem Schlagwort der Fahrerablenkung (*driver distraction*) diskutiert. Diese Leistungseinbußen liegen oftmals in der Fahraufgabe (z. B. Spurabweichungen, Geschwindigkeitsreduktionen und weniger Kontrollblicken im Spiegel) und sind Teil vieler Arbeiten (z. B. Young & Regan, 2007). Trotz dieser klaren und auch nachgewiesenen Gefahr von Fahrfehlern und Unfällen in Mehrfachaufgaben-Fahrsituationen zeigen die folgenden Unfallstatistiken allerdings auch, dass schwere Unfälle mit Verunglückten in Relation zu den Millionen gefahrenen Kilometern erstaunlicherweise selten passieren. Neben der Tatsache, dass die Anzahl der Verkehrstoten sinkt (ADAC, n.d.a), sind Fahrerinnen und Fahrer nur alle ca. vier Millionen Kilometer in einen schweren Unfall verwickelt (ADAC, n.d.b).

1.1.2. Idee des regulativen Fahrerverhaltens. Diese Gegenüberstellung im vorherigen Kapitel von einerseits der negativen Konsequenzen der Mehrfachaufgabenbearbeitung im Fahrkontext und andererseits der geringen Anzahl schwerwiegender Unfälle lässt den Schluss zu, dass Fahrerinnen und Fahrer offenbar über bestimmte Fähigkeiten oder Verhaltensweisen verfügen, die es ihnen erlauben, solch schwere Unfälle auch in höchst anspruchsvollen Mehrfachaufgaben-Fahrsituationen zu vermeiden. Diverse Studien untersuchten diese Fähigkeiten bereits im nicht-automatisierten Fahren (Platten, Schwalm & Krems, 2011; Platten, Milicic, Schwalm & Krems, 2013; Rauch, Gradenegger & Krüger, 2009; Schwalm, Keinath & Zimmer, 2008; Schwalm, Voß & Ladwig, 2015). Diese Arbeiten verfolgten einen ressourcenorientierten Ansatz, gemäß welchem Fahrerinnen und Fahrer Fähigkeiten besitzen, die es ihnen basierend auf einer Situationseinschätzung erlauben, festzustellen, wann es sicher ist, zusätzliche FFT zu bearbeiten, und wann diese aufgrund der gegebenen Fahrsituation unterbrochen werden müssen. D. h., Fahrerinnen und Fahrer scheinen ihre (kognitiven) Ressourcen zu regulieren und sie zwischen Fahraufgabe und FFT je nach Fahrsituation aufzuteilen. Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) griffen verschiedene theoretische Model-

le auf und konzeptualisierten dieses regulative Fahrerverhalten in einem Arbeitsmodell unter dem Begriff der funktionalen Verhaltensanpassungen. Der ganzheitliche Charakter des Arbeitsmodells macht es zu einem geeigneten Referenzrahmen für die umfassende Diskussion der erwähnten Fahrfähigkeiten der Unfallvermeidung.

Ein Beispiel kann das regulative Fahrerverhalten bzw. das Konzept der funktionalen Verhaltensanpassungen von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) besser verständlich machen: Ein/e Autofahrer/in fährt auf einer ländlichen Umgehungsstraße mit wenig Verkehr. Er/Sie unterhält sich mit Mitfahrenden und ist außerdem mit der Musikauswahl beschäftigt. Noch während der/die Fahrer/in diese FFT bearbeitet, nähert er/sie sich einer Autobahnauffahrt. An dieser Autobahnfahrt finden Baumaßnahmen statt, auf die auch Schilder einige hundert Meter vor der Baustelle aufmerksam machen. Sobald der/die Fahrer/in diese Schilder bemerkt, unterbricht er/sie die Bedienung des Radios. Als er/sie dann in die Baustelle einfährt, stoppt er/sie außerdem die Unterhaltung. Er/Sie konzentriert sich auf die veränderte Verkehrsführung und fährt auf die Autobahn auf. Erst nachdem er/sie dort sicher angekommen ist und die Wunschgeschwindigkeit erreicht hat, nimmt er/sie die unterbrochenen FFT wieder auf.

1.1.3. Trend des automatisierten Fahrens. Diese Mechanismen des regulativen Fahrerverhaltens wurden bisher insbesondere im Kontext des nicht-automatisierten Fahrens untersucht. Allerdings gab es in der Automobilbranche in den letzten Jahren Entwicklungen hin zum automatisierten Fahren. Im Jahr 2013 fuhr Mercedes-Benz beispielsweise automatisiert in einem Forschungsfahrzeug von Mannheim nach Pforzheim (Gold, 2014). Darüber hinaus scheint ein Großteil der Bevölkerung (ca. 85 %) gegenüber automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen aufgeschlossen zu sein (Herzberger, Schwalm, Reske, Woopen & Eckstein, 2019).

Diese Entwicklungen führen zu radikalen Veränderungen in der Mobilität und deren Grundfesten. Während Fahrerinnen und Fahrer im nicht-automatisierten Fahren kontinuierlich für die Ausführung und Überwachung der Fahraufgabe zuständig sind, ist eine solche dauerhafte Involvierung in die Fahraufgabe im automatisierten Fahren je nach Automatisierungsgrad nicht mehr zwingend erforderlich. So dürfen Fahrerinnen und Fahrer sich ab dem SAE Level 3 (zeitweise) von der Fahraufgabe abwenden und stattdessen mit FFT beschäftigen. Allerdings ist es gesetzlich geregelt, dass Fahrerinnen und Fahrer jederzeit in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen dürfen. Darüber

hinaus müssen sie im SAE Level 3 in kritischen Fahrsituationen jederzeit die Fahrzeugführung wieder übernehmen können. Erst in höheren Automationsstufen sind Fahrerinnen und Fahrer nicht mehr als Rückfallebene erforderlich (im SAE Level 4 in spezifischen Anwendungsfällen und lediglich im SAE Level 5 während der gesamten Fahrt) (Herzberger, Eckstein & Schwalm, 2018; SAE International, 2018).

Aus dieser Gegenüberstellung von einerseits einer reduzierten Involvierung in die Fahraufgabe und andererseits jederzeit möglichen oder sogar erforderlichen Eingriffen in die automatisierte Fahrzeugführung ergibt sich eine zentrale Frage im Hinblick auf die Verkehrssicherheit des automatisierten Fahrens. Es ist zu untersuchen, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer in Eingriffssituationen trotz eines potenziell fehlenden Situationsverständnisses eine sichere Fahrleistung gewährleisten können und ob sie zu diesem Zweck, vergleichbar zum nicht-automatisierten Fahren, auf die funktionalen Verhaltensanpassungen im Sinne einer Verteilung der zur Verfügung stehenden kognitiven Ressourcen zwischen Fahraufgabe und FFT zurückgreifen können. Die Überwachung der Fahraufgabe, d. h. die Situationswahrnehmung und -antizipation, ist nämlich eine der Voraussetzungen für die adäquate Aktivierung des regulativen Fahrerhaltens zur Unfallvermeidung (s. Schwalm et al., 2015; Voß & Schwalm, 2015).

1.1.4. Thematik der Arbeit. Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser, im vorherigen Kapitel diskutierten, Thematik an. Sie greift die zwei Themenfelder, nämlich das regulative Fahrerhalten im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sowie die aktuellen Entwicklungen des automatisierten Fahrens, auf und nimmt sich der Herausforderung an, sie auszubauen bzw. zu kombinieren. Ein detailliertes, empirisches Verständnis der funktionalen Verhaltensanpassungen allgemein und vor allem auch hinsichtlich deren Verfügbarkeit und Gestaltung im automatisierten Fahren ist ein essenzieller Baustein, um die fahrerseitigen Mechanismen zur Unfallvermeidung zu begünstigen und somit zu einem sichereren Straßenverkehr beizutragen. Automatisierte Fahrfunktionen könnten auf dieses Wissen zurückgreifen und Fahrerinnen und Fahrer in der Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen auch im Falle mangelnder Involvierung in die Fahraufgabe unterstützen und somit einen Beitrag zur Unfallvermeidung und Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten.

Aus diesem Grund wird die Zielsetzung (a) der theoriebasierten und empirischen Ausarbeitung ausgewählter Komponenten der von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten funktionalen Verhaltensanpassungen zur Unfallvermeidung sowie (b) der spezifischen Untersuchung der Verfügbarkeit und Ausprägung derselben im Rahmen des automatisierten Fahrens verfolgt. Die Auswahl der empirisch zu analysierenden Modellkomponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) basiert dabei auf der Durchsicht und Reflexion des bestehenden theoretischen Hintergrundes.

1.2. Aufbau der Arbeit

Zum Erreichen dieser Zielsetzung der Ausarbeitung und Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen und deren Relevanz für das automatisierte Fahren verfolgt die aktuelle Arbeit einen empirischen Ansatz aufbauend auf bestehenden Modellen und Untersuchungen. Hierzu ist in Kapitel 2 zunächst der theoretische Hintergrund dargestellt. Es wird auf FFT und grundlegende kognitive Fahrerprozesse, wie z. B. die zur Verfügung stehenden kognitiven Ressourcen, eingegangen. Als mögliche Ergebnisse der Kombination dieser beiden Elemente werden die Phänomene der driver distraction und des regulativen Fahrerverhaltens inklusive einer theoretischen Ausarbeitung des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) diskutiert. Als zentrales Element des regulativen Fahrerverhaltens wird dabei die subjektive Fahrleistungsbewertung hervorgehoben. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen wird außerdem auf die Neuerungen des automatisierten Fahrens eingegangen. Abgeleitet hiervon folgt in Kapitel 3 eine in den theoretischen Hintergrund eingebettete Spezifizierung des Forschungsgegenstands der aktuellen Arbeit sowie eine Übersicht der verfolgten Herangehensweise. Über die Identifikation offener Forschungsfelder werden die wissenschaftlichen Fragestellungen der aktuellen Arbeit abgeleitet, die im Rahmen von sechs empirischen Studien untersucht wurden. In den Kapiteln 4-9 sind diese sechs empirischen Studien detailliert inklusive der Methoden, Ergebnisse sowie einer studienspezifischen Diskussion berichtet. Anschließend finden eine generelle, studienübergreifende Diskussion und Reflexion der erlangten Ergebnisse statt (Kapitel 10). Diese beinhalten einen Überblick über die empirischen Studien und deren Bedeutung für die Zielsetzung der Arbeit sowie eine kritische Reflexion der Forschungsmethodik. Ein Kapitel zu den Implikationen und einem Ausblick (Kapitel 11) schließt die Arbeit ab.

2. Theoretischer Hintergrund

Ausgehend von der Zielsetzung der aktuellen Arbeit, die von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten funktionalen Verhaltensanpassungen auszuarbeiten und sie insbesondere im Rahmen des automatisierten Fahrens zu untersuchen, wird im Folgenden auf den für dieses Themenfeld relevanten theoretischen Hintergrund eingegangen. In Kapitel 2.1 wird hierzu zunächst kurz auf FFT allgemein eingegangen. Kapitel 2.2 umfasst anschließend zentrale kognitive Fahrerprozesse, die für die aktuelle Arbeit von Relevanz sein können. Als Konsequenz der FFT-Bearbeitung im Fahrkontext werden in Kapitel 2.3 das Phänomen der driver distraction und in Kapitel 2.4 die Idee des regulativen Fahrerverhaltens vorgestellt. Basierend auf der Sichtung der Vorarbeiten wird in diesem letzteren Kapitel im Sinne der Zielsetzung der Arbeit außerdem eine theoretische Ausarbeitung des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) vorgenommen. Als zentrales Element des regulativen Fahrerverhaltens umfasst Kapitel 2.5 ausführlich die Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung. Kapitel 2.6 geht zum Abschluss der Übersicht des theoretischen Hintergrundes auf die Entwicklungen und Herausforderungen des automatisierten Fahrens ein.

2.1. Fahrfremde Tätigkeiten (FFT)

Da der Untersuchungsgegenstand der aktuellen Arbeit, die funktionalen Verhaltensanpassungen, insbesondere im fahrbezogenen Mehrfachaufgabenkontext zur Anwendung kommt, wird im vorliegenden Kapitel ein kurzer Überblick zum Themenfeld der FFT gegeben.

Wie bereits in der Einleitung (Kapitel 1.1) angeführt wurde, beschäftigen sich Fahrerinnen und Fahrer in ca. 50 % ihrer Fahrzeit mit FFT (Dingus et al., 2006). Pro Fahrt bedeutet dies, dass im Durchschnitt zwei bis drei FFT ausführt werden. Dabei gehören Rauchen, Essen, Trinken und Interaktionen mit Mitfahrenden zu den häufigsten Beschäftigungen (Huemer & Vollrath, 2012). Aufgrund der Vielschichtigkeit der möglichen FFT, die während einer Fahrt auftreten können, gibt es verschiedene Klassifizierungsschemata. Huemer und Vollrath (2012) unterschieden FFT hinsichtlich ihrer Komplexität in einfache (z. B. Trinken), moderate (z. B. Haare kämmen) und komplexe (z. B. Make-up auftragen) FFT. Eine andere Herangehensweise wählten Lerner und Boyd (2005). Sie klassifizierten FFT inhaltlich nach technologiebasierten (z. B. Handynutzung) und nicht-technologiebasierten (z. B. Gespräche) FFT und stellten darüber

hinaus fest, dass es interindividuelle Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit gibt, mit der Fahrerinnen und Fahrer sich mit einer FFT während der Fahrt beschäftigen. So tendieren jüngere Menschen – und hier Männer mehr als Frauen – eher zur Ausführung einer FFT als ältere Verkehrsteilnehmende. Lerner und Boyd (2005) begründeten dies mit der subjektiven Wahrnehmung der Fahranforderungen. Die verschiedenen Arbeiten zusammenfassend, scheinen FFT also eine wichtige Rolle im Fahrkontext zu spielen. Um im weiteren Verlauf der Arbeit zu verstehen, welche Auswirkungen diese Mehrfachaufgabenbearbeitung haben könnte, werden im folgenden Kapitel die dabei relevanten kognitiven Prozesse betrachtet.

2.2. Kognitive Fahrerprozesse

Zum besseren Verständnis der Mechanismen und Auswirkungen der Mehrfachaufgabenbearbeitung im Fahrkontext werden im Folgenden zentrale Definitionen und Annahmen der Kognitionspsychologie hinsichtlich der Konzepte der Belastung und Beanspruchung (Kapitel 2.2.1), der kognitiven Ressourcen (Kapitel 2.2.2) sowie der Informationsverarbeitung (Kapitel 2.2.3) zusammengefasst und auf den Fahrkontext angewendet.

2.2.1. Belastung und Beanspruchung. Im Allgemeinen wird im kognitionspsychologischen Kontext zwischen der Belastung (Task Load) und der Beanspruchung (Workload) unterschieden (de Waard, 1996). Dabei werden im Sinne einer objektiven Größe alle Aspekte, die von außen auf eine Person einwirken, z. B. zu erfüllende Aufgaben (d. h. im Fahrkontext die Fahraufgabe sowie zusätzliche FFT), als Task Load verstanden. Als Workload hingegen gelten alle subjektiv wahrgenommenen personenbezogenen Auswirkungen des Task Loads (Hart, 2006; Ulich, 2001).

Hilburn und Jorna (2001) griffen diese Terminologie für den Mobilitätsbereich im Rahmen der Flugsicherung auf. Sie verstanden die (Mehrfach-) Aufgabenverarbeitung als ein Zusammenspiel aus Systemfaktoren (externale Faktoren wie Aufgaben und Umweltbedingungen) und Bedienerfaktoren (Fähigkeiten, Strategien, Erfahrungen etc.). Die Systemfaktoren summieren sich zur objektiven Belastung, die moderiert über die Bedienerfaktoren in eine subjektiv erlebte, interindividuell variable Beanspruchung mündet. Schwalm (2009) übertrug den Ansatz von Hilburn und Jorna (2001) in den automobilen Kontext (s. Abbildung 1). Während er den grundsätzlichen Prozessfluss des

ursprünglichen Modells beibehält, spezifizierte er sowohl die System- als auch Benutzerfaktoren. Die Systemfaktoren charakterisierte er als die Straßen- bzw. Umgebungsfaktoren, die Anforderungen durch den Verkehr, die ergonomischen Faktoren des Fahrzeugs sowie die Automation. Die Benutzerfaktoren beinhalteten die Fähigkeiten und Erfahrungen der Fahrerinnen und Fahrer, diesen zur Verfügung stehende Strategien, ihre Erfahrung sowie ihr Zustand. Das Modell von Schwalm (2009) bezieht sich ausschließlich auf die Fahraufgabe. Mögliche FFT finden noch keine Berücksichtigung. Allerdings ist im Sinne des Modells anzunehmen, dass jede FFT eigene Systemfaktoren besitzt, die die Belastung und in Konsequenz die Beanspruchung zusätzlich steigern werden (de Waard, 1996).

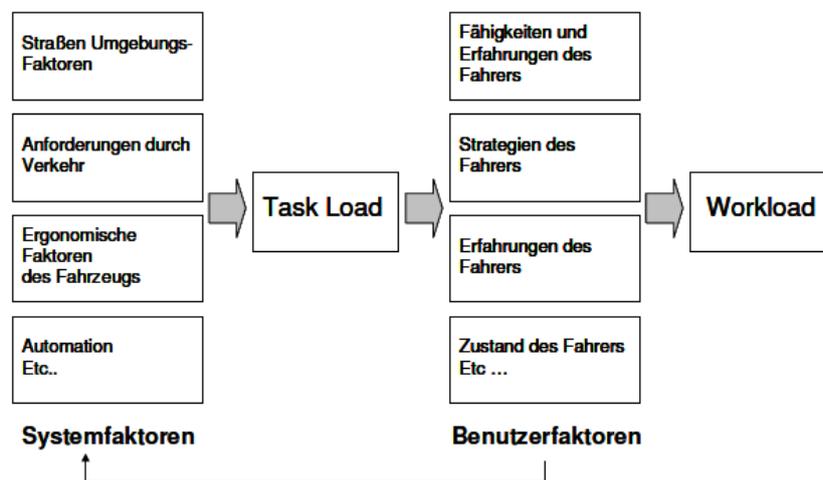


Abbildung 1. Übertragung des Ansatzes von Hilburn und Jorna (2001) auf den automobilen Kontext (entnommen aus Schwalm, 2009, S. 25)

2.2.2. Kognitive Ressourcen. Zur Bewerkstelligung der zuvor definierten Belastung, d. h. zur Erfüllung von Aufgaben, werden kognitive Ressourcen benötigt. Je mehr Aufgaben bearbeitet werden (z. B. die Fahraufgabe plus weitere FFT), desto höher sind die Belastung und somit auch der Bedarf an kognitiven Ressourcen. Eine allgemeine Annahme ist allerdings, dass diese menschlichen Verarbeitungskapazitäten begrenzt sind (Kahneman, 1973; Wickens, 2008). In der Literatur unterscheiden sich dabei die Ansichten darüber, wie diese Kapazitäten erreichbar sind bzw. zur Verfügung stehen. Während Kahneman (1973) der Auffassung war, dass für alle auszuführenden Aufgaben ein großer, gemeinsamer Pool von Ressourcen zur Verfügung steht, verfolgte Wickens (2008) die Idee, dass die verfügbaren kognitiven Ressourcen auf vier Ebenen aufgeteilt

sind (Wahrnehmung/Kognition vs. Response; räumlich vs. verbal; visuell vs. auditiv; zentrales vs. peripheres Sehen; s. Abbildung 2). In Abhängigkeit der Modalität einer zu erledigenden Aufgabe wird auf unterschiedliche Ressourcen bzw. Ebenen zurückgegriffen. Interferenzen bzw. Ressourcenkonflikte zwischen verschiedenen Aufgaben sind demnach nur zu erwarten, wenn mehrere Aufgaben auf die gleichen Modalitäten bzw. Ressourcen zurückgreifen. In diesem Fall ist die Beanspruchung zu hoch und es kann zu Leistungseinbußen kommen (de Waard, 1996; Pashler, 1994). Im fahrbezogenen Mehrfachaufgabenkontext bedeutet dies, dass vor allem dann mit Leistungseinbußen (Fahrfehlern bzw. Unfällen) zu rechnen ist, wenn eine FFT auf die gleichen Modalitäten wie die Fahraufgabe (d. h. vor allem visuell-manuell) zurückgreift.

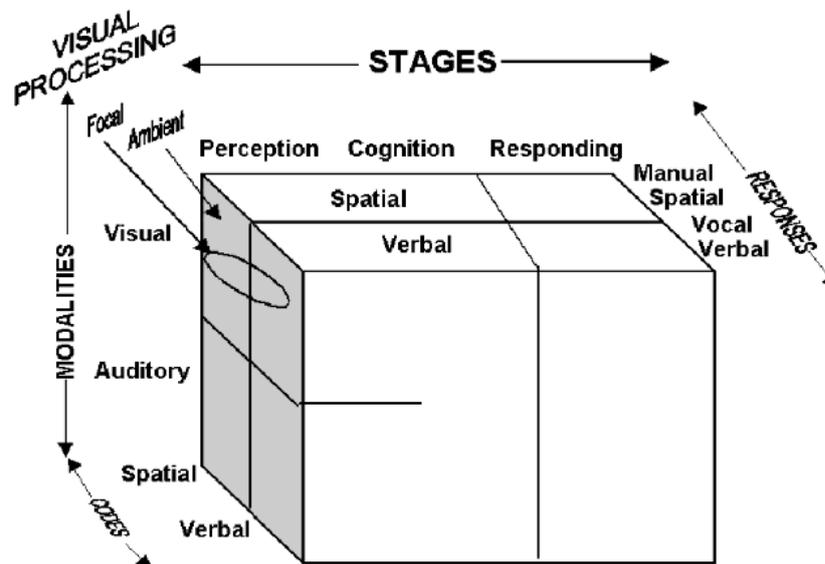


Abbildung 2. Ressourcenmodell nach Wickens (entnommen aus Wickens, 2008, S. 450)

2.2.3. Informationsverarbeitung und Aufgabenwechsel. Die vorherigen Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 zeigten, dass sich die Fahraufgabe und mögliche FFT zu einer bestimmten Belastung aufsummieren und Fahrerinnen und Fahrern zur Bewältigung dieser eine begrenzte Menge kognitiver Ressourcen zur Verfügung stehen. Um im weiteren Verlauf mögliche (negative) Konsequenzen der Mehrfachaufgabenbearbeitung bzw. die Fahrerfähigkeiten zur Unfallvermeidung erörtern zu können, wird im aktuellen Kapitel zunächst näher auf den Bewältigungsprozess der Informationsverarbeitung eingegangen. Es wird der Ablauf von der (Umgebungs-) Wahrnehmung bis hin zur Handlung in der Fahraufgabe dargelegt und der Effekt möglicher FFT auf diesen Prozess diskutiert.

Gemäß dem allgemeinen kognitionspsychologischen Modell von Wickens und Carswell (2006) wird im Kontext von zu bearbeitenden Aufgaben eine Information aus der Umwelt wahrgenommen, verarbeitet und anschließend eine adäquate Reaktion ausgewählt. Im Sinne eines sequenziellen Prozesses hat dabei die Wahrnehmung und Selektion der Informationen Auswirkung auf alle nachfolgenden Prozesse (Wickens & McCarley, 2008). Abendroth und Bruder (2012) griffen diese Idee auf und konkretisierten die Informationsverarbeitung für den Fahrkontext. Wie im allgemeinen Modell werden erneut drei Verarbeitungsstufen unterschieden. Erstens gibt es die Informationsaufnahme, in der alle Wahrnehmungsprozesse (z. B. hinsichtlich der Fahrzeugführung, der Fahrstrecke, anderer Verkehrsteilnehmender, der Wetter- und Sichtbedingungen) inkludiert sind. Zweitens findet die Informationsverarbeitung statt, in deren Rahmen Entscheidungen für bzw. gegen eine Handlung gefällt werden. Fahrercharakteristiken können diesen Schritt beeinflussen. Drittens ist die Informationsabgabe zu nennen. Hier werden motorische Handlungen durchgeführt, die wiederum Einfluss auf das Fahrzeug haben. Auf die begrenzten Kognitionsressourcen Bezug nehmend (Kahneman, 1973; Wickens, 2008), wird hingewiesen, dass diese drei Verarbeitungsstufen stark von der verfügbaren Aufmerksamkeit und somit auch von zusätzlichen FFT abhängig sind. Auch Strayer und Fisher (2016) beschäftigten sich mit der Informationsverarbeitung im Fahrkontext. In ihrem SPIDER Framework fassten sie die zuvor beschriebenen Vorgänge der Informationsverarbeitung unter den folgenden relevanten kognitiven Fahrerprozessen zusammen: Scanning, Predicting, Identifying, Decision making, Executing a Response.

Werden nun neben der Fahraufgabe zusätzliche FFT bearbeitet, müssen diese Prozesse der Informationsverarbeitung für sämtliche Aufgaben absolviert werden. Unter Berücksichtigung der begrenzten kognitiven Ressourcen wurde bereits angemerkt, dass es hierbei zu Interferenzen kommen kann (s. Kapitel 2.2.2). Zur Vereinbarung der diversen Aufgaben miteinander ist deshalb nach Monsell (2003) ein Wechsel zwischen den verschiedenen Aufgaben erforderlich. Levy und Pashler (2008) untersuchten die diesem Aufgabenwechsel unterliegenden Prozesse für den fahrbezogenen Mehrfachaufgabenkontext. In ihrer Studie führten die Versuchspersonen neben der gemäß Instruktion zu priorisierenden Fahraufgabe (Bremsreaktion) eine FFT aus. Es zeigte sich, dass die Teilnehmenden Schwierigkeiten hatten, die Priorisierung zwischen den zwei Aufgaben zu verschieben. Die Schwierigkeit lag insbesondere darin, bereits initialisierte Re-

aktionen in der FFT zu unterdrücken, wenn eine Bremsung erforderlich wurde. Als Maß hierfür wurden verlängerte Bremsreaktionszeiten angeführt. Im fahrbezogenen dual-task bzw. Mehrfachaufgabenkontext scheint folglich die Reaktion auf eine Aufgabe dann schneller zu sein, wenn die Informationsverarbeitung für diese vor der der anderen Aufgaben abläuft. Klassische Kognitionstheorien zum central bottleneck, die im Mehrfachaufgabenkontext Verzögerungseffekte in der Reaktion aufgrund eines Verarbeitungsengpasses postulieren (Klapp, Maslovat & Jagacinski, 2018), scheinen somit auch im Fahrkontext eine gewisse Gültigkeit zu besitzen. Für eine sichere Fahrleistung ist es gemäß Levy und Pashler (2008) erforderlich, dass die Fahraufgabe das „race to the bottleneck“ (S. 522) gewinnt. Die Reaktion in der Fahraufgabe muss vor Reaktionen in zusätzlichen FFT initialisiert werden. Dies ist in der Realität allerdings nicht immer der Fall. Die hieraus resultierenden negativen Konsequenzen werden deshalb im folgenden Kapitel betrachtet.

2.3. Driver distraction

Die erwähnten negativen Konsequenzen, die entstehen, wenn die Fahraufgabe das „race to the bottleneck“ (Levy & Pashler, 2008, S. 522) nicht gewinnt, werden in der Literatur unter dem Begriff der Fahrerablenkung (driver distraction) diskutiert. Young und Regan (2007, S. 380) definierten dieses Phänomen wie folgt: „Driver distraction results when drivers' normal cognitive processes [...] and adaptive strategies fail and drivers are no longer able to adequately divide their attention between the driving and secondary tasks and maintain driving performance at a satisfactory level.“ Diese Definition hebt hervor, dass eine Verschlechterung der Fahrleistung ein notwendiges Kriterium für das Auftreten von driver distraction ist. In diversen Arbeiten konnte ein solcher Zusammenhang zwischen der FFT-Bearbeitung und dem Unfallrisiko nachgewiesen werden (z. B. Horrey & Wickens, 2002). Laut Ascone, Lindsey und Varghese (2009) spielte driver distraction in 16 % aller fatalen Unfälle im Jahr 2008 eine Rolle. Außerdem konnte von ihnen eine FFT-Bearbeitung in 22 % aller in der 100-Car Studie von Dingus et al. (2006) dokumentierten (Beinahe-) Unfälle nachgewiesen werden.

Aufgrund dieser scheinbar hohen Sicherheitsrelevanz beschäftigte sich eine Vielzahl von Studien dezidiert mit dem negativen Einfluss der Bearbeitung einer FFT auf die Fahraufgabe (z. B. Hosking, Young & Regan, 2009; Mattes & Hallén, 2009; Owens, McLaughlin & Sudweeks, 2011; Young, Mahfoud, Walker, Jenkins & Stanton,

2008). Es ließen sich diverse Effekte nachweisen. So kommt es bei der Beschäftigung mit einer FFT zu langsamen oder fehlenden Reaktionen in der Fahraufgabe (McKnight & McKnight, 1993) bzw. zu längeren Reaktionszeiten auf unerwartete Fahrereignisse (Parkes & Hooijmeijer, 2000). Auch die visuellen Detektionsraten für Ereignisse in der Umgebung, die Blicke ins periphere Sichtfeld sowie das fahrerseitige Situationsbewusstsein sind reduziert (Recarte & Nunes, 2003; Wulf, Zeeb, Rimini-Döring, Arnon & Gauterin, 2013). Des Weiteren führt die FFT-Bearbeitung zu negativen Auswirkungen in der Querführung, z. B. zu vermehrtem Spurabweichen bzw. -verlassen (z. B. Greenberg et al., 2003; Tsimhoni & Green, 2001). Die mittlere Spurabweichung war dabei oftmals das zentrale Maß der Fahraufgabe (z. B. Burns, Trbovich, McCurdie & Harbluk, 2005; Harbluk, Burns, Lochner & Trbovich, 2007; Harbluk, Mitroi & Burns, 2009; Petzoldt, Bär & Krems, 2009; Petzoldt, Bär, Ihle & Krems, 2011; Richter, Ecker, Deisler & Butz, 2010; Rognin, Alidra, Val, Lescaut & Chalandon, 2007; Wilschut, Rinckenauer, Brookhuis & Falkenstein, 2005). Eine Studie von Peng, Boyle und Hallmark (2013) untersuchte außerdem den Zusammenhang zwischen der Aufgabenart der FFT sowie weiteren externen Faktoren auf das Spurhaltevermögen. Es konnte nachgewiesen werden, dass nur eine FFT-Bearbeitung mit Blickabwendung einen negativen Einfluss auf die Spurposition hatte und dass Faktoren wie der Straßentyp, die Spurbreite, das Fahreralter sowie die gefahrene Geschwindigkeit eine Rolle spielten. Auch andere Arbeiten differenzierten zwischen den FFT-Modalitäten und ihrem Einfluss auf die Fahraufgabe. So scheinen visuelle FFT im Vergleich zu kognitiven (Engström, Johansson & Östlund, 2005) oder sprachbasierten (Rauch, 2009) FFT vermehrt zu Interferenzen mit der Fahraufgabe zu führen. Dies deckt sich mit den in Kapitel 2.2.2 diskutierten zu erwartenden Interferenzen und Leistungseinbußen im Falle der Modalitätsüberschneidung von Fahraufgabe und FFT.

Die berichteten negativen Auswirkungen auf die Querregelung konnten allerdings nicht immer bestätigt werden. Östlund et al. (2004) zeigten sogar, dass es bei der Bearbeitung einer kognitiven FFT weniger Varianz in der Querführung gab. Dafür zeigten sich in dieser Arbeit aber schlechtere Leistungen in der Längsführung bei einer Folgefahrt. In eine ähnliche Richtung zielte die Studie von Harbluk, Noy, Trbovich und Eizenman (2007). Auch sie konnten einen negativen Einfluss der FFT-Bearbeitung auf die Längsführung nachweisen (häufigeres starkes Bremsen).

2.4. Regulatives Fahrerverhalten

Das vorangegangene Kapitel legt das unbestreitbare Risiko der Bearbeitung von FFT während der Fahrt als Konzept der driver distraction ausführlich dar. Mit Blick auf aktuelle Verkehrsstatistiken ist jedoch festzustellen, dass es neben der driver distraction ein weiteres Phänomen zu geben scheint. Es ist so, dass die Anzahl der Verkehrstoten in Deutschland sinkt (ADAC, n.d.a) und Fahrerinnen und Fahrer nur alle ca. vier Millionen Kilometer in einen schweren Unfall verwickelt sind (ADAC, n.d.b). Trotz der hohen Belastung durch zusätzliche FFT während der Fahrt und den begrenzten Kognitionsressourcen scheinen Fahrerinnen und Fahrer in der Lage zu sein, Unfälle zu vermeiden und eine sichere Fahrleistung zu gewährleisten. Dieser Auffassung sind auch Strayer und Fisher (2016), die eine fahrerseitige Selbstregulation (proaktiv und auch reaktiv) als Erklärung für dieses Phänomen der Unfallvermeidung anführten. In diesem Prozess der Selbstregulation beantworten Fahrerinnen und Fahrer für sich die Frage „Wann bearbeite ich eine FFT?“. Es scheint also keinen linearen Zusammenhang zwischen ablenkenden FFT und Unfällen zu geben. Stattdessen wird dieser Zusammenhang eher über den Fahrtkontext und vor allem auch durch fahrerseitiges kompensatives Verhalten modifiziert (Lee & Boyle, 2015).

In der vorliegenden Arbeit wird diese Fahrerfähigkeit zur Unfallvermeidung als regulatives Fahrerverhalten bezeichnet und in den folgenden Kapiteln näher betrachtet. Zunächst werden in Kapitel 2.4.1 verschiedene Modelle zur Erklärung des regulativen Fahrerverhaltens vorgestellt und diskutiert. U. a. wird das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) erläutert und darüber hinaus weiter ausgearbeitet. In Kapitel 2.4.2 wird empirischer Nachweis zur Existenz des regulativen Fahrerverhaltens gesammelt. Abschließend werden in Kapitel 2.4.3 gestalterische Maßnahmen zur Unterstützung des regulativen Fahrerverhaltens diskutiert.

2.4.1. Modelle zum regulativen Fahrerverhalten. In der Literatur beschäftigen sich bereits verschiedene Autorinnen und Autoren mit der Idee des regulativen Fahrerverhaltens. In den folgenden Kapiteln werden einige dieser Modelle näher erläutert. Zunächst wird in Kapitel 2.4.1.1 auf das Konzept des Situationsbewusstseins eingegangen, da es in verschiedenen Modellen des regulativen Fahrerverhaltens eine wichtige Rolle spielt. Anschließend wird in Kapitel 2.4.1.2 ein allgemeines Modell zur Aufgabenregulation vorgestellt. Es folgt in Kapitel 2.4.1.3 die Darstellung bisheriger Mo-

delle des regulativen Fahrerverhaltens. Abschließend wird in Kapitel 2.4.1.4 das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) eingeführt und theoretisch ausgearbeitet.

2.4.1.1. Situationsbewusstsein. Ein Konstrukt, welches Teil diverser Ansätze zum regulativen Fahrerverhalten ist und welches das Fahrerverhalten in dynamischen, d. h. in sich verändernden, Umgebungen beschreibt, ist das Situationsbewusstsein (Endsley, 1995a). Es beinhaltet drei Verarbeitungsstufen, deren Absolvieren für eine angemessene Reaktion auf Veränderungen in der Umgebung erforderlich ist. (Endsley, 1995a; 1995b; 2015). Diese Stufen sind die korrekte Wahrnehmung, ein richtiges Verständnis sowie eine richtige Vorhersage der Situationsentwicklung. Endsley (1988) fasste dies in der Definition des Situationsbewusstseins als „the perception of elements within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future“ (S. 792) zusammen.

Das PDC-Modell von Rauch (2009) bietet die Möglichkeit, das Konstrukt des Situationsbewusstseins in den automobilen Mehrfachaufgabenkontext zu transferieren. So werden auf einer Planungsebene (Planning) Strategien für die FFT-Bearbeitung abgeleitet. Auf der Entscheidungsebene (Decision) werden die Entscheidungen zur Ausführbarkeit einer FFT in einer bestimmten Situation getroffen. Die Kontrollebene (Control) dient schließlich der Überwachung der FFT-Bearbeitung im Situationsverlauf. Mit diesen drei Ebenen als kognitiver Grundlage kann das Fahrerverhalten inklusive der FFT-Bearbeitung als Indikator für das Situationsbewusstsein verstanden werden. Im Rahmen einer Studie erfasste Rauch (2009) so das Situationsbewusstsein in einer Fahraufgabe mit paralleler Bearbeitung einer FFT. Die Priorisierung zwischen Fahraufgabe und FFT wurde von Rauch (2009) als Maß genutzt, wie gut Fahrerinnen und Fahrer die Situation verstehen und antizipieren können.

2.4.1.2. Allgemeines Modell zur Aufgabenregulation. Als Hinführung zu spezifischen Regulationsmodellen im Fahrkontext dient das folgende Kapitel der Vorstellung eines allgemeinen Modells zur Aufgabenregulation. Hierbei handelt es sich um das compensatory control Modell von Hockey (1997), welches die Steuerung mehrerer gleichzeitig auftretender Aufgaben konzeptualisiert. Der Ausgangspunkt des Modells ist, dass, wie in Kapitel 2.2.2 berichtet, die kognitiven Ressourcen begrenzt sind und

zeitgleich auszuführende Aufgaben deshalb um diese begrenzten Ressourcen konkurrieren müssen. Gemäß Hockey (1997) werden zur Aufgabenbearbeitung zunächst Anstrengungen eingeplant und Ressourcen zur Verfügung gestellt. Sofern diese zur Verfügung gestellten Ressourcen unzureichend sind, können die Aufgaben nicht zufriedenstellend bearbeitet werden, was wiederum in Stress mündet. In diesem Fall wird als Gegenmaßnahme der sogenannte supervisory controller aktiviert, der zwei Handlungsoptionen besitzt. Erstens werden, für den Fall, dass weitere Ressourcen verfügbar sind, diese freigegeben und genutzt. Anders beschrieben werden die Anstrengungen erhöht und alle Aufgaben können weiterhin bearbeitet werden. Allerdings wird diese Option oftmals als aversiv erfahren. Zweitens führt, für den Fall, dass keine weiteren Ressourcen verfügbar sind, der supervisory controller eine Differenzierung der Aufgaben in wichtige Primär- und weniger wichtige Sekundäraufgaben durch. Während die Primäraufgaben gleichbleibend bearbeitet werden, werden die Leistungsziele und die Aktivität in den Sekundäraufgaben reduziert. Dieser Prozess erlaubt die Reduzierung der durch die handelnde Person erlebten Beanspruchung und die zur Verfügung stehenden Ressourcen sind ausreichend. Sobald die Beanspruchung in den Primäraufgaben sinkt und dort in Folge Ressourcen frei werden, können die Leistungsziele und die Aktivität in den Sekundäraufgaben wieder erhöht werden.

2.4.1.3. Bisherige Modelle zum regulativen Fahrerverhalten. Neben diesem allgemeinen Modell zur Aufgabenregulation von Hockey (1997) existieren diverse spezifische Modelle, die sich explizit mit dem regulativen Verhalten im Fahrkontext beschäftigen. Unter diesen gehört das Risikohomöostase-Modell von Wilde (1982) zu den bekanntesten (s. Abbildung 3). Gemäß diesem wird Autofahren als homöostatischer Regulationsprozess verstanden, in dem das Risiko abgeglichen wird. Es ist ein Modell zur Erklärung von Unfallursachen. Als relevante Modellkomponenten werden Situations- und Personenfaktoren sowie die in Kapitel 2.4.1.1 diskutierte Situationsantizipation genannt. Nach Wilde (1982) schätzen Fahrerinnen und Fahrer kontinuierlich das derzeitige bzw. erwartete Risiko einer Fahrsituation ein. Dabei gibt es ein individuell und situativ variierendes Zielrisiko, welches Fahrerinnen und Fahrer versuchen, über Verhaltensanpassungen (Geschwindigkeitsanpassungen) beizubehalten bzw. wiederherzustellen. Dieses Zielrisiko ist die einzige Entität, die im Modell von außen adaptiert werden kann (z. B. aufgrund von Zeitdruck oder der Aufgabenpriorisierung).

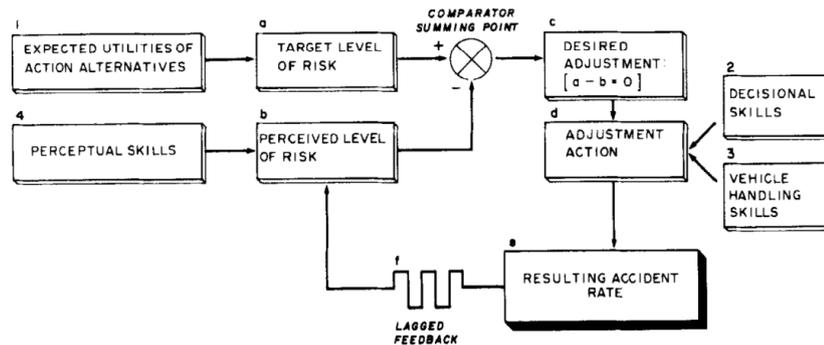


Abbildung 3. Risikohomöostase-Modell (entnommen aus Wilde, 1982, S. 212)

Auch Fuller (2000; 2005) beschäftigte sich mit der Idee der Homöostase. In seinem task-capability interface streben Fahrerinnen und Fahrer, vergleichbar zu dem Modell von Wilde (1982), ebenfalls eine Homöostase an. Allerdings ist nicht das Risiko, sondern die Aufgabenschwierigkeit die relevante Zielgröße. Das Modell ist in der Lage, über das Verhältnis der Leistungsfähigkeit (capability) und der Aufgabenanforderungen (task demands) die fahrerseitige Situationskontrolle zu spezifizieren. Die Leistungsfähigkeit ist dabei als das Potenzial der Fahrerinnen und Fahrer zu verstehen, welches sich aus biologischen Faktoren (z. B. kognitive Prozesse) sowie Fahrerfahrung ergibt. Motivation sowie Wachheit/Müdigkeit können je nach Ausprägung die Leistungsfähigkeit positiv bzw. negativ beeinflussen. Die Anforderungen stellen die Zusammensetzung aus Umweltfaktoren (Sicht, Straßenqualität etc.), anderen Verkehrsteilnehmenden, Fahrzeugigenschaften sowie weiteren durch die Fahrerinnen und Fahrer beeinflussbare Faktoren (z. B. Trajektorie, Route) dar. Die Zielgröße, die Aufgabenschwierigkeit, lässt sich aus der Differenz zwischen Leistungsfähigkeit und Anforderungen ableiten. Falls die Leistungsfähigkeit die Anforderungen übersteigt, handelt es sich um eine leichte Aufgabe. Schwierige Aufgaben liegen vor, wenn die beiden Entitäten sich ungefähr entsprechen. Für den Fall, dass die Anforderungen höher als die Leistungsfähigkeit sind, ist die Aufgabe zu schwierig und Fehler (Unfälle) sind zu erwarten. Durch Anpassungen in der Fahrzeugsteuerung (Geschwindigkeitsanpassungen) versuchen Fahrerinnen und Fahrer die präferierte Aufgabenschwierigkeit beizubehalten bzw. wiederherzustellen.

Ein weiteres Modell, das driver calibration Framework, stammt von Horrey, Leusch, Mitsopoulos-Rubens und Lee (2015). Sie beschrieben die regulativen Fähigkeiten in einer sich verändernden Fahrsituation unter Berücksichtigung diverser Situations- und Nutzerfaktoren. Wie bei Fuller (2000; 2005) wurde ein Abgleich von Anforderun-

gen und Leistungsfähigkeit postuliert, der als Kalibrierung bezeichnet wird. In Abhängigkeit des Urteils im Kalibrierungsprozess entscheiden Fahrerinnen und Fahrer, inwiefern Handlungsanpassungen (z. B. Anpassungen der Geschwindigkeit) vorgenommen werden müssen. Gut kalibrierte Fahrerinnen und Fahrer schätzen sich gemäß dem Modell in einer bestimmten Situation in Abhängigkeit der ihnen zur Verfügung stehenden Fertigkeiten realistisch ein und sind in der Lage, adäquate Entscheidungen zu treffen, die eine sichere Fahrleistung garantieren. Dieses Modell weist starke Übereinstimmungen mit dem Ansatz von Kuiken und Twisk (2001) auf, die ebenfalls annahmen, dass ein zentrales Element für eine unfallfreie Fahrt die Kalibrierung von Fahrerinnen und Fahrern ist. Sie verstanden die Kalibrierung als kontinuierliches Abwägen von aktuellen sowie zukünftigen Aufgabenanforderungen und Fähigkeiten. Im Sinne eines Regulationsprozesses können Fahrerinnen und Fahrer auch hier die Aufgabenanforderungen modellieren, indem sie z. B. die Geschwindigkeit reduzieren.

Schließlich ist das multiple comfort Modell von Summala (2005) zu nennen. Dem Modell liegt die Forderung zugrunde, dass derzeit Modelle fehlen, die das dynamische Fahrverhalten von Fahrerinnen und Fahrern erklären können. Summala verband in seinem Ansatz zwei zentrale Komponenten bestehender Modelle zum regulativen Fahrerverhalten: die Rolle der Emotionen und die Idee einer Sicherheits- bzw. Komfortzone. So wird Autofahren erstens durch Emotionen wie beispielsweise Angst gelenkt. In dem Versuch, diese Emotionen in einem individuell angestrebten Bereich zu halten, antizipieren Fahrerinnen und Fahrer die Situation und passen ihr Handeln an. Summala (2005) verwies in diesem Kontext auf die bestehenden, zuvor bereits genannten Modelle von Wilde (1982) und Fuller (2000, 2005). Außerdem führte er seine zero risk Theorie (Näätänen & Summala, 1974; Summala, 1988) an. Diese besagt, dass Fahrerinnen und Fahrer überhaupt kein Risiko wahrnehmen, da sie sich an die Tatsache adaptieren, dass Fahren mit einem gewissen Risiko verbunden ist. Eine Risikowahrnehmung erfolgt nur in kritischen, unerwarteten Situationen. In diesem Fall beginnen Fahrerinnen und Fahrer zu kompensieren (z. B. durch Geschwindigkeitsreduktionen oder erhöhte Anstrengungen), um das Risiko wieder auf null zu reduzieren. Insofern versteht auch dieses Modell Fahren als einen kontinuierlichen Regulierungsprozess. Zweitens postulierte Summala (2005) in seinem multiple comfort Modell die Idee, dass Fahrerinnen und Fahrer bestimmte Komfort- bzw. Sicherheitszonen besitzen, die ihnen in Abstimmung auf die Emotionen und Motive eine sichere Fahrleistung ermöglichen. Diese Zonen können in

Zeit und in Distanz angegeben werden (z. B. THW, TLC, TTC oder Lateralabstand, s. Summala, 1988). Außerdem können Ziele und Motive diese Zonen verändern. In Anlehnung an die zero risk Theorie (Näätänen & Summala, 1974; Summala, 1988) wird dabei die Komfortzone als der angestrebte Bereich verstanden, in dem kein Risiko verspürt wird. Parameter, die Fahrerinnen und Fahrer versuchen, im Bereich der Komfortzone zu halten, sind die räumlichen und zeitlichen Sicherheitsbereiche (safety margins, s. auch Summala, 1988), der veranschlagte Fahrtverlauf, die Regelbeachtung, das Fahrgefühl sowie der Fahrspaß. Einzig bei letzterem Punkt sind Fahrerinnen und Fahrer teilweise bereit, die Komfortzone zu überschreiten.

Diese Erklärungsansätze und Modelle bieten bereits eine fundierte Grundlage zur Erklärung des regulativen Fahrerverhaltens. Allerdings fokussieren sie sich zumeist auf die Fahraufgabe und betrachten die FFT nur am Rande. Des Weiteren wird das Beanspruchung/Workload-Konzept, welches für die Regulation zentral zu sein scheint (s. Hockey, 1997 in Kapitel 2.4.1.2), nicht bzw. nur bedingt berücksichtigt und kein ganzheitlicher Ansatz zur Erklärung der Fahrerregulation angestrebt. D. h., jedes Modell konzentriert sich für sich auf eine Möglichkeit der Regulation, eine Kombination der verschiedenen Optionen wird nicht diskutiert. Aus diesem Grund entwickelten Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) ein ganzheitlicheres Arbeitsmodell, welches versucht, diese genannten Punkte zu berücksichtigen. Aufgrund seines ganzheitlichen Ansatzes wird es als zentraler Referenzpunkt dieser Arbeit genutzt und im folgenden Kapitel vorgestellt sowie ausgearbeitet.

2.4.1.4. Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen. Wie zuvor diskutiert, besitzen bestehende Modelle zum regulativen Fahrerverhalten einige Nachteile, die eine ganzheitliche Betrachtung der fahrerseitigen Fähigkeiten zur Unfallvermeidung erschweren. Deshalb erarbeiteten Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm 2015) ein Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen, das auf bestehenden Modellen und Ansätzen, die im Verlauf des Kapitels 2 berichtet wurden, basiert und die vorgestellten Ideen zum regulativen Fahrerverhalten (Fuller, 2005; Horrey et al., 2015; Summala, 1988; Wilde, 1982) integriert. Es stellt einen Ansatz zur Erklärung der fahrerseitigen Fähigkeiten zur Unfallvermeidung insbesondere im Mehrfachaufgabenkontext dar. Basierend auf der Idee, dass die gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Aufgaben zu Inferenzen führen kann (s. z. B. de Waard, 1996; Pashler, 1994 in Kapitel 2.2.2),

verfolgt das Arbeitsmodell einen ressourcenorientierten Ansatz. Dieser beinhaltet, dass Fahrerinnen und Fahrer Ressourcen besitzen, die sie zum erfolgreichen Lösen der Fahraufgabe und zusätzlichen FFT aufwenden und (um-) verteilen können. Erste konzeptionelle Ideen stammten in diesem Zusammenhang von Schwalm (2009, s. Kapitel 2.2.1) und Platten (2012), die in Folge von Schwalm et al. (2015) sowie Voß und Schwalm (2015) ausgearbeitet wurden. An dieser Stelle der Arbeit sollen die Modellidee vorgestellt und die Detaillierung des Arbeitsmodells erweitert werden. Es werden die einzelnen Modellkomponenten in die zugrunde liegenden Bestandteile aufgeschlüsselt und die theoretischen Hintergründe, d. h. die jeweils relevanten Vorarbeiten, berichtet.

Der aktuelle, im Rahmen der vorliegenden Dissertation theoriebasiert überarbeitete Stand des Arbeitsmodells ist in Abbildung 4 zu finden.

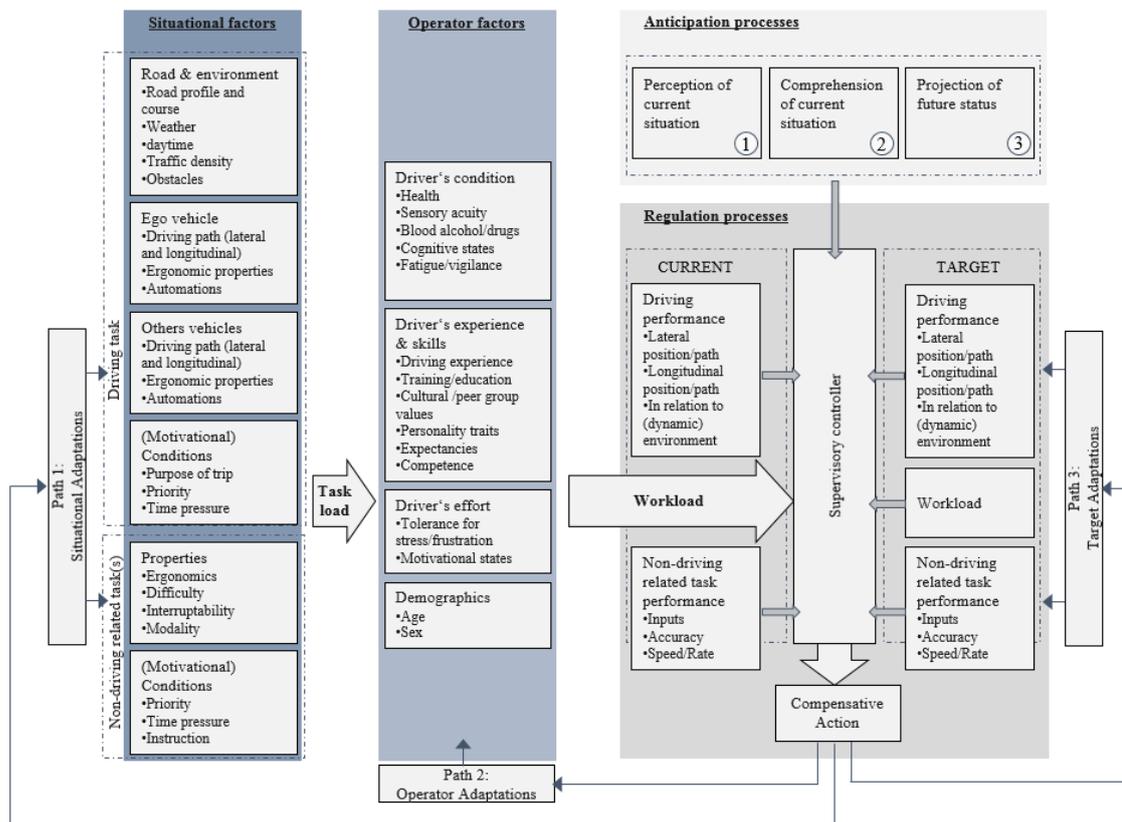


Abbildung 4. Weiterentwickelte Version des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015)

Basierend auf den Ideen von Hilburn und Jorna (2001, s. Kapitel 2.2.1), die ein Belastung-Beanspruchungsmodell für den Luftfahrtkontext entwickelten, nimmt das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) an, dass eine Fahrsi-

tuation aus Situationsfaktoren (situational factors) besteht, die zu einer bestimmten Belastung (Task Load) führen. Diese Situationsfaktoren bestehen sowohl aus Charakteristiken der Fahraufgabe (Umgebung, Ego-Fahrzeug, andere Verkehrsteilnehmende, motivationale Umstände) als auch der FFT (Eigenschaften, motivationale Umstände). Modifiziert über vier Kategorien von Nutzerfaktoren (operator factors) – nämlich der Fahrerzustand, die Fahrerfahrung, der Aufwand und die Demografie – führt diese Belastung in Übereinstimmung mit allgemeinen Belastungs-Beanspruchungsmodellen (z. B. Hart, 2006) zu einer subjektiv erfahrenen Beanspruchung. Die Auswahl der Kategorien von Situations- und Nutzerfaktoren basierte auf den Erkenntnissen von Fuller (2005), Hilburn und Jorna (2001), Horrey et al. (2015), Näätänen und Summala (1974) sowie Wilde (1982). In Abbildung 4 sind sowohl für die Situations- als auch für die Nutzerfaktoren die Spezifikationen der einzelnen Kategorien dargestellt.

Neben diesem Belastungs-Beanspruchungskonzept ist ein zentraler Pfeiler des Modells ein sogenannter supervisory controller, wie er von Hockey (1997) in seinem compensatory control Modell eingeführt wurde (s. Kapitel 2.4.1.2). Hockey (1997) nahm an, dass im Verlauf einer Handlungssequenz die veranschlagten kognitiven Ressourcen möglicherweise nicht ausreichend sind, um eine bestehende Mehrfachaufgabensituation erfolgreich zu meistern. Zur Stressvermeidung besitzen Menschen gemäß Hockey (1997) in solchen Situationen ein regulierendes System, den supervisory controller, das verschiedene Strategien zur Lösung des Ressourcenkonflikts zur Verfügung stellt. Die Idee dieses Regulationsprozesses wurde von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) in den Fahrkontext übernommen und in das Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen eingebettet. Die spezifischen Funktionsweisen des supervisory controllers sind allerdings noch nicht final definiert. In diesem Sinne ist diese Entität derzeit noch als kognitive Black Box zu verstehen. In Abhängigkeit der Beurteilung der aktuellen und der Antizipation der zukünftigen (Fahr-) Situation (abgeleitet vom Konzept des Situationsbewusstseins von Endsley, 1988; 1995a; 1995b; 2015) vergleicht der supervisory controller die aktuellen Leistungsniveaus in der Fahraufgabe, der FFT sowie dem Workload mit Zielwerten in diesen drei Entitäten. Sofern in einer der Größen eine Diskrepanz zwischen Ist- und Sollwert detektiert oder erwartet wird (d. h. zum Beispiel, wenn die aktuelle Fahrleistung nicht mit den subjektiven Zielwerten in der Fahraufgabe übereinstimmt), wird versucht, über kompensative Handlungen das Gleichgewicht wiederherzustellen. Hierzu stehen Fahrerinnen und Fahrern drei (proak-

tive) Regulationsmechanismen (Pfade) zur Verfügung. Erstens können situative Anpassungen, wie sie u. a. bereits von Fuller (2000; 2005) und Horrey et al. (2015) diskutiert wurden, vorgenommen werden (Pfad 1). Dies wären z. B. Geschwindigkeitsreduktionen. Zweitens sind Anpassungen der Nutzerfaktoren, wie z. B. Erhöhungen der aufgewendeten Anstrengungen, möglich (Pfad 2). Diese zweite Möglichkeit wurde u. a. von Hockeys (1997) Ansatz (Fahrerinnen und Fahrer können in begrenztem Maße weitere Ressourcen zur Verfügung stellen) und von Fullers (2000; 2005) Modell (Fahrerinnen und Fahrer akzeptieren einen gewissen Aufwand für die Aufgabenerfüllung) abgeleitet. Auch Näätänen und Summala (1974) diskutierten diese Idee. Sie postulierten, dass Fahrerinnen und Fahrer zur Reduktion des subjektiven Risikogefühls kognitive Prozesse, wie z. B. die Vigilanz, anpassen könnten. Eine dritte Möglichkeit der kompensativen Handlungen liegt in der Anpassung der Zielwerte (Pfad 3). Diese Idee wurde bereits in Wildes (1982) Theorie der Risikohomöostase eingeführt. Er postulierte die subjektiven Zielwerte als einzige anpassbare Einheit zur Vermeidung von Unfällen.

Im Allgemeinen sind Pfad 2-Anpassungen eher selten zu erwarten, da Steigerungen der Anstrengungen als aversiv erfahren werden (s. Hockey, 1997). Daher sind die Anpassungen eher auf den Pfaden 1 und 3 anzunehmen. Dabei ist es offensichtlich, dass die sicherheitskritische Fahraufgabe im Vergleich zu FFT als wichtiger bewertet wird. Anpassungen der Ziele und Aktivität werden folglich eher in der FFT erfolgen, während versucht wird, die Fahrleistung auf einem konstanten und ausreichenden Niveau zu halten.

2.4.2. Empirischer Nachweis zum regulativen Fahrerverhalten. Das vorangegangene Kapitel zeigt, dass sich eine Vielzahl von Autorinnen und Autoren mit der theoretischen Idee des regulativen Fahrerverhaltens beschäftigte. Aus diesem Grund erscheint es als höchst relevant, empirische Untersuchungen zu diesem Thema beizubringen. In diesem Kontext stellten Strayer, Turill, Cooper, Coleman, Medeiros-Ward und Biondi (2015), wie viele unter Kapitel 2.3 genannte Studien der driver distraction, den Zusammenhang zwischen kognitiver Ablenkung und dem Phänomen der driver distraction dar. Im Gegensatz zu vielen dieser Arbeiten diskutierten sie allerdings auch die Möglichkeit des regulativen Fahrerverhaltens. Sie stellten heraus, dass der Zusammenhang zwischen Ablenkung und driver distraction oftmals nicht linear ist und es deshalb eine weitere relevante Komponente, das regulative Fahrerverhalten, geben muss,

die diesen Prozess moderiert. Aufgrund der Relevanz dieses potenziell moderierenden Faktors auf die Verkehrssicherheit forderte die Forschungsgruppe vermehrt empirische Studien in diesem Bereich der Mehrfachaufgabenbearbeitung im Fahrkontext.

Eine Vielzahl empirischer Studien entsprach dieser Forderung und konnte für das nicht-automatisierte Fahren zeigen, dass Fahrerinnen und Fahrer Anpassungen in der Fahraufgabe vornehmen, sobald sie sich im Mehrfachaufgabenkontext befinden (insbesondere Pfad 1 im Arbeitsmodell von Schwalm et al.). Oftmals reduzieren Fahrerinnen und Fahrer ihre Geschwindigkeit bei gleichzeitiger Bearbeitung einer FFT (Haigney, Taylor & Westermann, 2000; Liu & Lee, 2006; Lansdown, Brook-Carter & Kersloot, 2004; Waugh et al., 2000). Andere Studien konnten zwar keine Adaptionen in der Längs-, dafür aber in der Querregelung identifizieren. So kommt es bei Ausführung einer FFT während des Fahrens z. B. zu weniger Spurwechseln (Beede & Kass, 2006; Fitch, Toole, Grove, Soccolich & Hanowski, 2017).

Während sich diese Arbeiten hauptsächlich mit Effekten in der Fahraufgabe beschäftigten, untersuchte eine andere Gruppe von Studien mögliche Adaptionen in der FFT (Pfade 1 und 3 im Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015)). So verstanden Liang, Horrey und Hoffmann (2015) Fahrerinnen und Fahrer nicht als passive, sondern als aktive Rezipientinnen und Rezipienten von FFT. D. h., sie entscheiden aktiv, wann sie sich wie stark mit welcher FFT beschäftigen. In diesem Zusammenhang konnten beispielsweise Schwalm et al. (2008) zeigen, dass Fahrerinnen und Fahrer den Fahrtverlauf antizipieren und die FFT unter Berücksichtigung der Fahrsituation sowie der FFT-Eigenschaften regulieren. In kritischen Fahrsituationen reduzierten Fahrerinnen und Fahrer die FFT. Zu ähnlichen Befunden kamen auch diverse andere Studien (Platten et al., 2013; Platten, Schwalm, Hülsmann & Krems, 2014; Platten et al., 2011; Rauch et al., 2009; Schwalm, 2009). Fahrerinnen und Fahrer scheinen außerdem die Bearbeitung von FFT in Erwartung einer subjektiv kritischen Fahrleistung zu reduzieren (Schwalm et al., 2015) bzw. FFT nur in Situationen mit einer ausreichenden Fahrleistung auszuführen (Rauch, 2009).

Viele Studien beschäftigten sich darüber hinaus im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen mit der Regulierung der Nutzung mobiler Endgeräte (z. B. Handy/Smartphone). In einer NDS-Studie analysierten Huth, Sanchez und Brusque (2014) die Telefonnutzung an Ampelkreuzungen. Es konnte strategisches Verhalten nachgewiesen werden, dass in Abhängigkeit der spezifischen FFT (Tippen oder Telefonieren)

variierte. Die vor allem visuell-motorische Aufgabe des Tippens wurde im Sinne der Ressourcenüberschneidung verschiedener Aufgaben (s. Wickens, 2008; s. Kapitel 2.2.2) insbesondere an roten Ampeln, d. h., wenn nicht gefahren wurde, ausgeführt. Auch Tivesten und Dozza (2014) analysierten Realfahrtsdaten. Sie konnten zeigen, dass die Konzentration auf die Fahraufgabe bzw. die Beschäftigung mit einer FFT (Handynutzung) stark vom Fahrkontext abhängt. Zu diesem Schluss kamen auch Fitch, Hanowski und Guo (2014) in ihrer Studie. Die Handynutzung, und hier insbesondere die Gespräche, veränderte sich in Abhängigkeit des Fahrkontexts. Im Sinne einer Beanspruchungsregulation gab es bei höherem Verkehrsaufkommen, an bzw. in der Nähe von Kreuzungen und bei Auffahrten weniger Gespräche.

Wandtner, Schumacher und Schmidt (2015; s. auch Schömig, Schoch, Neukum, Schumacher & Wandtner, 2015) kamen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass eine solche Selbstregulation im Sinne der FFT-Anpassung im Endeffekt zu einer besseren Fahrleistung führt. Hierzu verglichen sie auf deskriptiver Basis über den Zeitverlauf die Versuchsdaten zweier Versuchspersonengruppen. In der einen Gruppe wurde den Teilnehmenden die zeitliche Taktung der FFT-Bearbeitung freigestellt. In der anderen Gruppe wurden die Teilnehmenden zur Bearbeitung der FFT unter Zeitdruck gesetzt. In Verbindung mit der Situationsantizipation erlaubte die freie Adaptation der FFT der ersten Versuchspersonengruppe eine sichere Fahrt, da sie die FFT in kritischen Fahrsituationen unterbrach.

Entgegen der diversen zuvor berichteten empirischen Nachweise des regulativen Fahrerverhaltens gab es allerdings auch Studien, in denen keine Adaptation der FFT auftrat. Platten (2012) konnte zeigen, dass es zu keiner Unterbrechung der FFT in kritischen Situationen kommt, sofern Leistungsver schlechterungen in derselben zu erwarten sind. In diesem Fall kommt es eher zu einer Erhöhung der investierten Anstrengungen (Pfad 2 im Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015)).

Wie diese Zusammenstellung verschiedener empirischer Studien zeigt, scheint es im Rahmen des nicht-automatisierten Fahrens die von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten fahrerseitigen funktionalen Verhaltensanpassungen zu geben. Dabei scheinen diese vor allem auf den Pfaden 1 und 3 des Arbeitsmodells zu liegen. In ihrem Literaturreview warfen Young und Regan (2007) allerdings die Frage auf, ob vor allem auch die empirisch nachweisbaren Anpassungen in der Fahraufgabe eine strategische Anpassung von Fahrerinnen und Fahrern sind oder eher als Konse-

quenz der Ablenkung durch eine FFT gesehen werden müssen (d. h. eher driver distraction). Aus diesem Grund sind, wie von Strayer und Cooper (2015) gefordert, Kausalitätsuntersuchungen notwendig, die klären können, ob das regulative Fahrerverhalten tatsächlich existiert.

2.4.3. Maßnahmen zur Unterstützung des regulativen Fahrerverhaltens.

Die vorangegangenen Kapitel legen nahe, dass ein funktionierendes regulatives Fahrerverhalten essenziell für eine sichere Fahrleistung ist. Aus diesem Grund beschäftigten sich verschiedene Autoren mit den Möglichkeiten, wie Fahrerinnen und Fahrer bei der Bewältigung komplexer Mehrfachaufgabensituationen unterstützt und so Unfälle vermieden werden können. Piechulla, Mayser, Gehrke und König (2003) führten hierzu die Idee des Workload-Dimmings an. Über eine kontinuierliche Überwachung der Beanspruchung (des Workloads), könnte im Falle anspruchsvoller Verkehrssituationen die FFT gedimmt werden. Diese Reduktion der Beanspruchung und die Freigabe von kognitiven Ressourcen für die Fahraufgabe würden die Mechanismen eines supervisory controllers unterstützen (s. Kapitel 2.4.1.2 und 2.4.1.4). Beispielsweise könnte in Situationen, in denen der vorhergesagte Workload einen Schwellenwert überschreitet, eine Rufumleitung integriert werden. In ähnlicher Weise forderten Levy und Pashler (2008) eine Fahrerunterstützung basierend auf ihrer kognitiven Verarbeitungstheorie (s. Kapitel 2.2.3). Damit die Verarbeitung der Fahraufgabe zuerst abläuft, sollten FFT unterdrückt bzw. verzögert werden. Muigg (2009) setzte diese Ideen in einem Workload-Management-System um. Dieses System soll dafür sorgen, dass Fahrerinnen und Fahrer in anspruchsvollen Situationen nicht durch zusätzliche Fahrzeugmeldungen abgelenkt werden. Bei zu hoher Beanspruchung werden keine bzw. nur sehr wichtige Meldungen durchgelassen.

2.5. Subjektive Fahrleistungsbewertung

Das vorangegangene Kapitel zeigt u. a., dass die subjektive Fahrleistungsbewertung ein zentrales Element des regulativen Fahrerverhaltens zu sein scheint. Gemäß Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) dienen die Zielwerte in der Fahraufgabe bzw. deren Abgleich mit der aktuellen Fahrleistung als ein zentraler Indikator für die Aktivierung funktionaler Verhaltensanpassungen. Aus diesem Grund wird die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung im aktuellen Kapitel näher betrachtet. Mit dem

Ziel, die zugrunde liegenden Dimensionen der subjektiven Fahrleistungsbewertung zu verstehen, wird unter Kapitel 2.5.1 zunächst auf verschiedene Modelle der subjektiven Fahrleistungsbewertung eingegangen. In Kapitel 2.5.2 wird daraufhin die Idee der von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten Zielwerte in der Fahrleistung spezifiziert. Abschließend werden in Kapitel 2.5.3 mögliche Einflussfaktoren auf die subjektive Fahrleistungsbewertung diskutiert.

2.5.1. Modelle der subjektiven Fahrleistungsbewertung. Wie zuvor erwähnt, ist die subjektive Fahrleistungsbewertung ein zentrales Element der funktionalen Verhaltensanpassungen bzw. des regulativen Fahrerverhaltens. Aus diesem Grund wird im aktuellen Kapitel zunächst auf die grundlegende Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung eingegangen. Es werden Modelle vorgestellt, die sich mit diesem Prozess zugrunde liegenden Faktoren bzw. Dimensionen beschäftigen. Tabelle 1 bietet eine Übersicht über verschiedene, im Kontext der vorliegenden Dissertation relevante Ansätze. Die Tabelle basiert auf den Originalquellen sowie einem Literaturreview von Eberl (2014, entnommen und angepasst von S. 32). Wie die Tabelle zeigt, konzeptualisierten die aufgenommenen Arbeiten das subjektive Fahrerleben auf unterschiedliche Weise (psychologische bzw. interdisziplinäre Ansätze) und strukturierten es zumeist in dem Konstrukt zugrunde liegende Faktoren bzw. Dimensionen. Hierbei sind der Komfort und die Sicherheit/Kontrollierbarkeit Faktoren, die oftmals Eingang in die Erklärungsansätze finden und als zentrale Elemente der subjektiven Fahrleistungsbewertung verstanden werden. Weiterhin scheinen viele bestehende Ansätze die subjektive Fahrleistungsbewertung vor allem für die Längsführung zu betrachten.

Tabelle 1

Übersicht verschiedener Modelle und Erklärungsansätze zur subjektiven Fahrleistungsbewertung

Quelle	Ansatz	Faktoren/Dimensionen
Dick (2001, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Psychologischer Ansatz • Fahren als räumliche und zeitliche Erfahrung • Erklärung von Stimmungsvariationen und intentionalen Handlungen beim Fahren <ul style="list-style-type: none"> ○ Mögliche Stimmungen (Störung, Anregung, Routine, Entspannung) liegen zwischen den Hauptdimensionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wechsel/Moment vs. Kontinuität/Dauer • Begrenzung/Absicherung vs. Freiraum/Expansion

Eberl (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Interdisziplinärer Ansatz • Fahrerleben bei der Bedienung von Gaspedalen in Elektrofahrzeugen (Längsführung) • Vorgehen zur Dimensionsextraktion: bestehende Modelle als Basis → Erweiterung durch Experten-Workshops → explorative Umfrage als Validierung • Fahrerleben wird durch die Rahmenbedingungen Fahrzeug, Mensch und Umfeld beeinflusst 	<ul style="list-style-type: none"> • Komfort (Gefallen, Entspannung) • Diskomfort (psychische und physische Beanspruchung) • Sicherheit (Vorhersehbarkeit, Beeinflussbarkeit) • Energiegefühl (Energierückgewinnung, Energieeffizienz)
Engelbrecht, Engelen und Arndt (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Motivationspsychologisches Modell • Identifikation von fahrspaßfördernden/fahrspaßreduzierenden Tätigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrspaß (durch Aktivierung)/ Fahrspaßmangel (durch Langeweile) • Komfort (durch Entspannung)/ Diskomfort (durch Stress)
Grzesik (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Physiologische Simulation des Bremsverhaltens von Fahrzeugführern 	<ul style="list-style-type: none"> • Zurechtkommen • Kontrollierbarkeit • Sicherheit • Komfort • Akzeptanz
Haider (1977)	<ul style="list-style-type: none"> • Interdisziplinärer Ansatz • Längsführung • Zusammenhang von Subjektiv- und Objektivkomponenten <ul style="list-style-type: none"> ○ Subjektive Kontrollüberzeugung → subjektives Fahrerleben ○ Durchschaubarkeit, Vorhersehbarkeit und Beeinflussbarkeit → Bediensicherheit 	
Popiv (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeit zur Erhöhung der Antizipation der Fahrerinnen und Fahrer und zu Auswirkungen auf Effizienz und Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung • Gefallen • Energieeffizienz • Komfort • Sicherheit • Bevormundung
Tischler und Renner (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Interdisziplinärer Ansatz • Modell zum subjektiven Fahrerleben • Fahrerleben als Interaktion von Mensch, Fahrzeug und Umwelt • Literaturrecherche zur Bestimmung fahrspaßförderlicher bzw. -hemmender Aspekte und Ableitung von Dimensionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Komfort • Rückmeldung • Längsdynamik • Handlungsfreiheit • Kontrollierbarkeit

Toda und Kageyama (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Interdisziplinärer Ansatz • Modell zum subjektiven Fahrerleben • Kombination vom psychologischen Konstrukt Fahrspaß und technischen Parametern (Fokus: Fahrspaß und Kontrollierbarkeit) • Herleitung über Teststreckenversuche und Subjektivbefragungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrspaß • Kontrollierbarkeit
Vilimek, Keinath und Schwalm (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • MINI E Feld-Studie 	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheit • Reichweite • Energieeffizienz • Gefallen • Stimulation • Kompetenz • Pedalbetätigungsverhalten
Winner (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Komfort • Sicherheit • Erwartungskonformität
Zimmer (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • Konstrukt zur subjektiven Risikowahrnehmung • Klassifikation verschiedener Risikofaktoren auf den definierten Dimensionen • Diskussion zur Risikowahrnehmung von Verkehrsunfällen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrollierbarkeit (Unbekanntheit/Unkontrollierbarkeit vs. Bekanntheit/Kontrollierbarkeit) • Angstausslösung (niedrig vs. hoch)

Anmerkung. Neben den Originalquellen sind Teile der Tabelle entnommen und angepasst aus Eberl (2014, S. 32).

2.5.2. Subjektive Schwellenwerte in der Fahrleistung. Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Arbeiten beschäftigten sich vornehmlich mit den der subjektiven Fahrleistungsbewertung zugrunde liegenden Dimensionen und Konzepten. Einen anderen wichtigen Aspekt in der subjektiven Fahrleistungsbewertung stellen darüber hinaus die von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten Zielwerte in der Fahrleistung dar. Diese Zielwerte werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation unter dem Begriff der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung vor dem Hintergrund zweier Punkte näher untersucht. Erstens wurden diese Ziel- bzw. Schwellenwerte bzw. ein Abweichen hiervon von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) als zentraler auslösender Faktor der funktionalen Verhaltensanpassungen diskutiert. Zweitens sind diese Schwellenwerte als untere Grenze der Zielbereiche in der Fahrleistung zu verstehen. Zur Gewährleistung der Akzeptanz einer Fahrleistung (der Eigenen, als Beifahrer bzw. Beifahrerin oder auch als Passagier bzw. Passa-

gierin eines automatisierten Fahrzeugs) sollten diese Schwellenwerte folglich nicht überschritten werden. Aufgrund der somit anzunehmenden zentralen Rolle der subjektiven Schwellenwerte in der Fahrleistung hinsichtlich Sicherheit (Auslösung funktionale Verhaltensanpassungen) und Komfort (Akzeptanz einer Fahrleistung) wird im Folgenden auf bestehende Arbeiten in diesem Themenfeld eingegangen.

Allgemein wird aus rein technischer Sicht oftmals die Fahrstreifenmitte als ideale Trajektorie angesehen (Werling, 2011). Allerdings stellte bereits Michon (1985) fest, dass dies nicht zwingend mit der subjektiven Präferenz von Fahrerinnen und Fahrern übereinstimmt, und differenzierte deshalb zwischen objektiven und subjektiven Sicherheitsschwellen. Dieser Idee folgten auch Bellem et al. (2017), die zum besseren Verständnis das Beispiel einer Kurvenfahrt anführten. In Kurven tendieren Fahrerinnen und Fahrer dazu, die Kurve zu schneiden, um so geringeren lateralen Beschleunigungen ausgesetzt zu sein und folglich einen höheren Fahrkomfort zu erleben. Auch Fischer, Küpper und Schöggel (2014) beschäftigten sich mit der subjektiven Trajektorienpräferenz in einer Kurvenfahrt. Ein zu geringer Lateralabstand zwischen zwei sich entgegengerichteten Fahrzeugen führt gemäß ihnen in einer automatisierten Fahrt zu einem subjektiven Unsicherheitsgefühl. Dabei scheint diese subjektive Fahrleistungs- bzw. Trajektorienbewertung interindividuell zu variieren (Siebenpfeiffer, 2014).

Fahrerinnen und Fahrer scheinen beim Fahren also nicht ausschließlich Risiko vermeiden zu wollen (s. Kapitel 2.4.1.3), sondern streben zusätzlich Entspannung, Sicherheit, Spaß, ausreichend Vigilanz und Spannung an. Die reine Fahrleistung ist somit nicht immer von höchster Priorität (Vaa, 2014). Dieser Auffassung sind auch die folgenden Autoren. Gemäß Shinar (2015) zeigen Fahrerinnen und Fahrer typischerweise nicht immer ihre maximale (Fahr-) Leistung. Engström (2011) bezeichnete dies als „satisficing mode“ (S. 37). Fahrerinnen und Fahrer betreiben nur so viel Aufwand, dass sie in einem subjektiv komfortablen Bereich verbleiben. Hancock und Sawyer (2015) postulierten darüber hinaus, dass in spezifischen Szenarien die Spurhaltung der eigenen Spur nicht einmal relevant ist. Fahrerinnen und Fahrer geben sich zumeist mit einer zur Situationsbewältigung ausreichenden Leistung zufrieden und versuchen gar nicht immer, das technische Optimum (d. h. die Nulllinie) zu erreichen.

Insgesamt scheinen die subjektiven Fahrleistungspräferenzen also nicht immer mit einem technisch optimalen Wert übereinzustimmen. Die Fahrleistungszielwerte (bzw. das Abweichen hiervon) können jedoch einen zentralen Auslöser funktionaler

Verhaltensanpassungen darstellen (s. Kapitel 2.4.1.4). Aus diesem Grund ist die Objektivierung der subjektiven Fahrleistungsbewertung bzw. die Spezifikation der Zielwerte von hoher Relevanz für das Verständnis des regulativen Fahrerverhaltens. Engels (1994, in Zomotor, Braess & Rönitz, 1998) schlug zu diesem Zweck als Messgröße beispielsweise eine Kombination der Zeit mit dem Lateralversatz vor. Die Zeit, die es dauert, bis das Fahrzeug einen subjektiv akzeptierten Fahrleistungsbereich verlässt und Fahrerinnen und Fahrer die Notwendigkeit von Fahrkorrekturen verspüren, wäre das relevante Maß der subjektiven Fahrleistungsbewertung. Neben diesen theoretischen Überlegungen existieren in der Literatur bereits empirische Studien zur lateralen bzw. longitudinalen Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsschwellen bzw. einer subjektiv bevorzugten Trajektorie. Diese sind in Tabelle 2 (Querführung) und Tabelle 3 (Längsführung) zusammengefasst. Für die laterale Spurposition wurden sowohl Simulations- als auch Realstudien, die u. a. das Überholverhalten analysierten, durchgeführt. Sie zeigten, dass die laterale Spurposition scheinbar stark von der Anwesenheit von Gegenverkehr beeinflusst ist. Hinsichtlich des Einflusses weiterer Faktoren, wie z. B. der Geschwindigkeit und der Fahrstreifenbreite, erzielten die Studien heterogene Ergebnisse. Aus einer Methodenperspektive konnte außerdem nachgewiesen werden, dass es zu unterschiedlichen Ergebnissen zwischen einer Simulations- und Realstudie kommen kann (z. B. konservativere Schwellenwerte im Realfahrzeug in der Studie von Blana und Golias (2002)). In der Längsführung konnten die Studien, die vor allem präferierte THW identifizierten, Zusammenhänge zwischen dem objektiven Fahrparameter und verschiedenen Subjektivkriterien (z. B. Risikowahrnehmung) finden. Allgemeiner schlussfolgerten Papakostopoulos, Maramaras und Nathanael (2017), dass die subjektiven Fahrleistungspräferenzen durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Während dies für die laterale Position insbesondere Aspekte hinsichtlich der Fahrbahn sind, wird die Wahrnehmung der longitudinalen Position von Aspekten hinsichtlich des Bewegungsflusses sowie der Position und des Abstands zu potenziellen Hindernissen beeinflusst.

Tabelle 2

Empirische Studien zur lateralen Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsschwellen bzw. einer bevorzugten Trajektorie

Quelle	Hintergrund (Theorie, Ablauf etc.)	Ergebnisse/Schlussfolgerungen
Blana und Golias (2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich der lateralen Position im Simulator und in Realstudie (jeweils 100 VP) • Szenario: Einspurige Landstraße mit Rechts- und Linkskurve sowie einer Geraden 	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeit beeinflusst die laterale Position • Effekt der Testbedingung: Höhere laterale Distanzen und geringere Standardabweichungen der lateralen Position im Realfahrzeug im Vergleich zum Simulator
Dijksterhuis, Brookhuis und de Waard (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Spuraltefehler sind Ursache vieler Unfälle • Ziel: Analyse des Zusammenhangs zwischen der Fahrleistung und subjektiven/physiologischen Maßen bei verschiedenen Lenkanforderungen • Simulatorstudie mit 30 VP: Manipulation der Fahrstreifenbreite und des Verkehrsaufkommens (Gegenverkehr) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiebung der Lateralposition nach außen bei Gegenverkehr • Geringere Fahrstreifenbreite führt zu keiner näheren Position an der Mittellinie • Annahme: Laterale Spurposition = Zentrum der Sicherheitszone; Standardabweichung der lateralen Spurposition = Breite der Sicherheitszone
Dozza, Schindler, Bianchi-Piccinini und Karlsson (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Beim Überholen eines Fahrrads regulieren Autofahrerinnen und -fahrer ihre Geschwindigkeit und laterale Spurposition in Abhängigkeit des Gegenverkehrs (Versuch, innerhalb der eigenen Fahrleistungs-Komfortzone zu bleiben) • Ziel: Bestimmung der fahrerseitigen Komfortzonen/Schwellenwerte der Komfortzone • E-Bike (22 km/h auf Landstraße); Aufzeichnung (Videos, Distanz, Dauer, comfort zone boundaries (CZB)) 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrigere CZB mit Gegenverkehr (< 1.5 m) im Vergleich zu freier Fahrt • Gegenverkehr hält nicht vom Überholen ab • Keine Beeinflussung des lateralen Abstands durch Geschwindigkeit und Fahrstreifenbreite
Godthelp (1988)	<ul style="list-style-type: none"> • Bezugnahme auf Rashevsky (1970, in Godthelp, 1988), der einen Schwellenwert einer akzeptierten Lateralabweichung postulierte • „dead zone“: Keine Eingriffe → Fehler werden bis zu einem bestimmten Punkt toleriert/ignoriert • Studie mit Instruktion an Versuchspersonen, erst bei Diskomfort in die Fahrzeugführung einzugreifen 	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Geschwindigkeit werden 40-60 cm Abstand von der Spurbegrenzung akzeptiert; darunter Eingriff • Je schneller man fährt, desto höher ist der minimale Schwellenwert der Spurbegrenzung → die TLC bleibt immer ungefähr gleich

Lenz und Burger (1975)	<ul style="list-style-type: none"> • Es besteht eine Abhängigkeit des lateralen Fahrverhaltens von mehreren Faktoren: 1) Geschwindigkeit; 2) Fahren im Pulk; 3) Beeinträchtigungen durch Gegenverkehr; 4) Breite des Fahrzeugs • Realfahrten auf Versuchsstrecke; Messung von 870 Fahrzeugen 	<ul style="list-style-type: none"> • Unter 100 km/h: Mittige Spurposition mit Tendenz nach rechts • Freie Fahrt vs. Gegenverkehr: Mit Gegenverkehr ca. 15 cm weiter rechts (109 cm vs. 124 cm entfernt von der Mittellinie) • Geringe Effekte für Fahrzeuge im Pulk • Ausrichtung des Fahrzeugs nach Abstand zwischen Achse und Fahrbahnmitte (unabhängig von der Fahrstreifenbreite)
Parkin und Meyers (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • NDS zur Messung der Lateralabstände beim Überholen eines Fahrrads • Untersuchung verschiedener Streckenabschnitte (Variation Geschwindigkeit und Existenz Radspur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Lateralabstände bei höheren Geschwindigkeiten und Existenz einer Radspur
Rosey, Auberlet, Moisan, Dupré (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung der Spurposition in Abhängigkeit des Fahr Szenarios im Fahr-simulator • Szenario: Landstraße; Gegenverkehr (LKW vs. PKW), Variation der Fahrstreifenbreite 	<ul style="list-style-type: none"> • Lateralposition näher an Fahrbahnmitte bei geringer Fahrstreifenbreite • Kein Effekt der Geschwindigkeit • Unabhängig von der Fahrstreifenbreite gab es eine Verschiebung der Lateralposition nach Passieren des Gegenverkehrs
Summala (1980)	<ul style="list-style-type: none"> • Nur kleiner Anteil der Unfälle entsteht durch Überholvorgänge • Viele Unfälle, die durch zu nahes Auf-fahren/zu nahes Fahren an der Mittellinie in Vorbereitung auf einen Überholvorgang entstehen, werden nicht mitgezählt • Studienziel (Realversuch auf Landstraße): Untersuchung, ob Warten auf Überholmöglichkeit die safety margins reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Überholverbot: größere Zeitabstände zu Vorderfahrzeug und höherer Lateralabstand • Fazit: Beim Warten auf ein Überholmanöver werden die safety margins verringert; sie sind also variabel
Summala, Leino & Vierimaa (1981)	<ul style="list-style-type: none"> • NDS zur Erfassung der Lateralposition auf verschiedenen Straßen mit Gegenverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Gegenverkehr gab es auf breiteren Fahrbahnen geringere Ausweichmanöver als auf schmaleren • Frei fahrende Fahrzeuge weichen eher aus als Fahrzeuge in Folgefahrten
Triggs (1980)	<ul style="list-style-type: none"> • NDS zur Beobachtung von Fahrzeugen mit Gegenverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Gegenverkehr zeigen Fahrzeuge eine Ausweichbewegung weg von der Fahrbahnmitte

Triggs (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • NDS zur Beobachtung von Fahrzeugen mit Gegenverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Gegenverkehr zeigen Fahrzeuge eine Ausweichbewegung weg von der Fahrbahnmitte • Beginn der Ausweichbewegung mehr als 5 s vor Passieren der Fahrzeuge • Nach Passieren der Fahrzeuge Bewegung zurück zu lateraler Ausgangsposition • Fahrzeuge mit größtem Abstand zur Fahrbahnmitte beginnen Ausweichbewegung später als Fahrzeuge mit geringerem Abstand
---------------	---	--

Tabelle 3

Empirische Studien zur longitudinalen Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsschwellen bzw. einer bevorzugten Trajektorie

Quelle	Hintergrund (Theorie, Ablauf etc.)	Ergebnisse/Schlussfolgerungen
Crawford (1963)	<ul style="list-style-type: none"> • Überholvorgang erfordert Beurteilung der Fahrsituation • Entscheidung für/gegen Überholvorgang variiert interindividuell in nicht eindeutigen Situationen • Teststreckenversuch mit Überholzenario inkl. Gegenverkehr; Variation der Geschwindigkeit und der Lücke zwischen Ego-Fahrzeug und Gegenverkehr 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenn die Schwelle, ab der eine Lücke als zu klein eingeschätzt wird, erreicht wird, brauchen Fahrerinnen und Fahrer länger für ihre Reaktion • Bessere Urteile bei langsameren Geschwindigkeiten
Lewis-Evans, de Waard und Brookhuis (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung des Zusammenhangs zwischen THW und Risiko, Aufgabenschwierigkeit, Anstrengung sowie Komfort • Simulatorstudie mit 40 VP: Variation des THW zwischen 0.5 und 4.0 s in 0.5 s Abständen + 1 freie Fahrt (eigständige Wahl der THW) 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwelle der präferierten THW scheint bei ungefähr 2 s zu liegen • Korrelation der Parameter Risiko, Aufgabenschwierigkeit und Anstrengung
Siebert, Oehl und Pfister (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel: Replikation der Ergebnisse von Lewis-Evans et al. (2010) ▪ Simulatorstudie: 3 Geschwindigkeiten; 8 THW (Variation in 0.5 s Schritten) + je eine freie Fahrt pro Geschwindigkeit • Fragebögen zum Fahrerleben (Kritikalität/Kontrollierbarkeit) nach jeder Situation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Beeinflussung der Subjektivratings durch THW von 4.0-2.5 s ▪ Kritischer THW: 1.5-2.0 s ▪ Risikowahrnehmung, Aufgabenschwierigkeit, Anstrengung, Komfort wird durch THW beeinflusst • Korrelation aller Subjektivparameter

<p>Siebert, Oehl, Bersch und Pfister (2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Replikation/Fortführung der bisherigen Studien von Lewis-Evans et al. (2010) und Siebert et al. (2014) ▪ Simulatorstudie: SAE Level 0 vs. SAE Level 1 (ACC); 3 Geschwindigkeiten; Variation der THW (in 0.5 bzw. 0.1 s Schritten) + 6 freie Fahrten • Bewertung von Risiko und Komfort pro THW 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestätigung des kritischen THW/der Schwelle zwischen 1.5 und 2.0 s ▪ Schwellenwerte unterliegen interindividuellen Unterschieden ▪ Keine Effekte von Geschwindigkeit und Automatisierungslevel
<p>Summala (1980)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nur kleiner Anteil der Unfälle entsteht durch Überholvorgänge • Viele Unfälle, die durch zu nahes Auf-fahren/zu nahes Fahren an der Mittellinie in Vorbereitung auf einen Überholvorgang entstehen, werden nicht mitgezählt • Studienziel (Realversuch auf Landstraße): Untersuchung, ob Warten auf Überholmöglichkeit die safety margins reduziert 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Überholverbot: größere Zeitabstände zu Vorderfahrzeug und höherer Lateralabstand ▪ Fazit: Beim Warten auf ein Überholmanöver werden die safety margins verringert; sie sind also variabel

Neben den allgemeinen Modellen zur subjektiven Fahrleistungsbewertung (s. Tabelle 1) und den in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengestellten Spezifikationen subjektiver Fahrleistungsschwellen in Längs- und Querrichtung, konzeptualisierten andere Modelle die Idee der subjektiv akzeptierten Fahrleistungsbereiche. Bereits 1938 postulierten Gibson und Crooks ihre Feldtheorie, die sämtliche möglichen sowie sicheren Pfade eines Fahrzeugs zu beschreiben versucht (s. Abbildung 5). Die Autoren nahmen zwei objektiv definierbare Bereiche, nämlich das field of safe travel und die minimum stopping zone, an. Je kleiner die field-zone ratio (das Verhältnis der zwei Felder) ist, desto mehr Risiko nehmen Fahrerinnen und Fahrer in Kauf. Kontaratos (1974) erweiterte diesen Ansatz und definierte unter Berücksichtigung interindividueller Aspekte drei Zonen in seinem accident-causation Modell. In der crash zone ist ein Unfall unvermeidbar, während in der threat zone die Situation zwar gefährlich erscheint, aber noch gelöst werden kann. Die Ausdehnung dieses Bereichs ist definiert durch subjektive, fahrerseitige Bewertungen. Der Bereich außerhalb der threat zone, in dem ein Unfall unwahrscheinlich ist, wird als indifference zone bezeichnet. Der subjektive Sicherheitspuffer (margins of safety) liegt zwischen der crash und threat zone. Ohta (1993, in Teh, Jamson, Carsten & Jamson, 2014) quantifizierte diese safety margins über den Zeitab-

stand zwischen zwei Fahrzeugen. Bei einem Abstand von 0.6 s oder weniger besteht Angst vor einem Unfall. Auch ein Abstand zwischen 0.6 und 1.1 s wird noch als kritisch wahrgenommen. Dahingegen liegt zwischen 1.1 und 1.7 s die normal bzw. comfort zone. Die pursuit zone beginnt bei einem zeitlichen Abstand von 1.7 s.

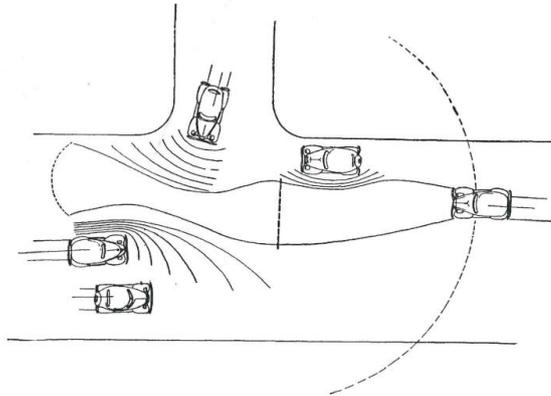


Abbildung 5. Fields of safe travel (entnommen aus Gibson & Crooks, 1938, S. 455)

Ein aktuelles Modell stammt von Papakostopoulos et al. (2017). Es baut auf den Ideen von Gibson und Crooks (1938) auf und nimmt an, dass die fields of safe travel dynamisch sind, da sie von der Umgebung und von den Einschätzungen der Fahrerinnen und Fahrer abhängen. Die Umgebungseinflüsse bestehen aus visuell-basierten (d. h. die Wahrnehmung in Abhängigkeit perzeptueller Randbedingungen) und skript-basierten (d. h. die Situationsantizipation der Fahrerinnen und Fahrer) Faktoren, die zu allen möglichen räumlichen Bewegungsfeldern integriert werden. Die Einschätzungen der Fahrerinnen und Fahrer beziehen sich insbesondere auf das Ego-Fahrzeug und können sensorisch- (d. h. fahrerseitige Wahrnehmung zur Einschätzung des eigenen Fahrzeugs) oder schema-basiert (d. h. fahrerseitiges Wissen über Fahrzeugeigenschaften und nicht sichtbare Fahrzeugteile) sein. Die Integration der verschiedenen Fahrereinschätzungen ergibt das mentale Bild der Fahrerinnen und Fahrer über das Fahrzeug (Abmessungen und Dynamik). Die fields of safe travel resultieren schlussendlich aus der Kombination der möglichen Bewegungsfelder und dem mentalen Bild hinsichtlich des Fahrzeugs.

Ein abschließendes, ebenfalls aktuelles Modell wurde von Bärnman, Smith und Werneke (2015) entwickelt (s. Abbildung 6). Wie auch bei Kontaratos (1974) und Ohta (1993, in Teh et al., 2014) sind innerhalb des Modells verschiedene Zonen definiert. Dies ist zum einen die Komfortzone, innerhalb der Fahrerinnen und Fahrer sich aufhal-

ten wollen. Die Diskomfortzone wird manchmal aufgrund der Situationsbeschaffenheit betreten, allerdings versuchen Fahrerinnen und Fahrer, sie wieder schnellstmöglich zu verlassen. In die Furchtzone versuchen Fahrerinnen und Fahrer niemals bewusst einzutreten. Diese drei Zonen stellen zusammen die Sicherheitszone dar. Hinter der Grenze der Sicherheitszone liegt die Abmilderungszone. In dieser passieren Unfälle zwar auf jeden Fall, die Unfallschwere kann jedoch noch reduziert werden. Der Sicherheitsabstand (safety margin) stellt den Bereich zwischen der Fahrzeugfront und der Grenze der Sicherheitszone dar. Bärghman et al. (2015) führten zur näheren Lokalisierung der Zonengrenzen eine Studie durch. In dieser konnten sie zeigen, dass Menschen in Eile bereit sind, sich zwar in die Diskomfort- nicht aber in die Furchtzone zu begeben.

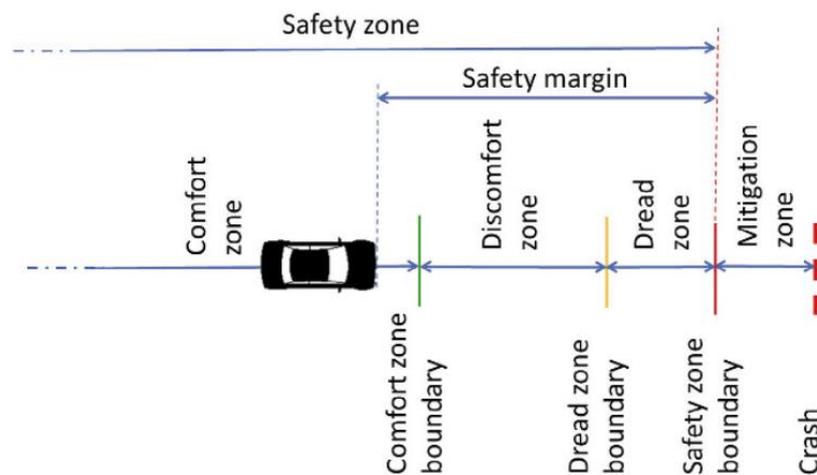


Abbildung 6. Zonen der Fahrzeugführung (entnommen aus Bärghman et al., 2015, S. 171)

2.5.3. Einflussfaktoren auf die subjektive Fahrleistungsbewertung. Wie einige der zuvor genannten Arbeiten und Modelle anmerkten (s. z. B. Tabelle 2 und Tabelle 3), scheinen die subjektiven Trajektorienpräferenzen durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst zu sein. Folglich liegt der Schluss nahe, dass auch das Konstrukt der subjektiven Fahrleistungsbewertung im Allgemeinen von Personen- und Situationsfaktoren beeinflusst wird. Allerdings gibt es in diesem Bereich bisher wenige konkrete Studien. Vor dem Hintergrund, dass die subjektive Fahrleistungsbewertung bzw. die subjektiven Fahrleistungsschwellen zentrale Auslöser der funktionalen Verhaltensanpassungen darstellen und essenziell für Akzeptanz einer Fahrleistung sein können (s. Kapitel 2.5.2), erscheint ein Wissen über mögliche Einflüsse jedoch unerlässlich. Ausgehend von Hancock und Sawyers (2015) Annahme, dass Fahrerinnen und Fahrer

im Grunde nur so viel Aufwand in der Fahraufgabe betreiben, wie zum Garantieren einer sicheren Fahrleistung benötigt wird, sind es vermutlich die Parameter, die in Relation zu einem erhöhten Unfallrisiko gebracht werden, die auch negativen Einfluss auf die subjektive Fahrleistungsbewertung haben. Im Folgenden werden auf der Annahme basierende, mögliche Einflussfaktoren vorgestellt.

Vaa (2014) sowie Näätänen und Summala (1974) stellten allgemein fest, dass Personenfaktoren einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Young und Regan (2007) spezifizierten dies auf die Fahrerfahrung. Diverse Arbeiten lieferten dazu den Nachweis, dass mit steigender Fahrerfahrung eine bessere Fahrleistung zu erwarten ist (Crundall, Underwood & Chapman, 1999; Konstantopoulos, Chapman & Crundall, 2010; Lajunen & Summala, 1995; Mueller & Trick, 2012; Wikman, Nieminen & Summala, 1998). Andere Ansätze bezogen eher Persönlichkeitseigenschaften, insbesondere das Sensation Seeking, in ihre Überlegungen hinsichtlich des Einflusses von Personenfaktoren auf das Fahrverhalten ein. Studien konnten nachweisen, dass eine starke Ausprägung dieser Persönlichkeitseigenschaft mit einem risikoreichen Fahrstil korreliert (Arthur & Graziano, 1996; Heino, 1996; Horvath & Zuckerman, 1993; Iversen & Rundmo, 2002; Jonah, 1997; Jonah, Thiessen & Au-Yeung, 2001; Oltedal & Rundmo, 2006; Yagil, 2001).

Neben den Personenfaktoren können auch Umgebungsfaktoren die Fahrleistung negativ beeinflussen und sich somit auf die subjektive Fahrleistungsbewertung auswirken. Dabei wird oftmals das Wetter, und hier vor allem Regen, als potenzieller Einflussfaktor diskutiert (Ashley, Strader, Dzibla & Haberlie, 2015; Hautière, Dumont, Brémond & Ledoux, 2009; Konstantopoulos et al., 2010). Der Umgebungsverkehr stellt einen anderen zentralen Umweltfaktor dar, der oftmals im Rahmen der subjektiven Fahrleistungsbewertung diskutiert wird. So konstatierten Hancock und Sawyer (2015), dass eine Fahrt bei freier Strecke milder bewertet wird als bei hohem Verkehrsaufkommen. Es scheint eine positive Korrelation zwischen dem Verkehrsaufkommen und der fahrerseitigen Belastung zu geben (Schießl, 2008). Gemäß Tivesten und Dozza (2014) ist dabei unter Bezugnahme auf diverse Vorarbeiten (Björnstig, Björnstig & Eriksson, 2008; Engström, Victor & Markkula, 2013; Serafin, 1994) der Gegenverkehr klar relevanter als der mitfließende Verkehr.

2.6. Entwicklung des automatisierten Fahrens

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt wurde, ist der sichere bzw. unfallfreie Individualverkehr mit dem PKW in der heutigen Gesellschaft ein zentrales Anliegen (Hütter 2013; Statistisches Bundesamt, 2016). Zur Schaffung eines umfassenden Verständnisses für diesen Sachverhalt und zur Herleitung einer der zentralen Fahrerhaltensweise zur Unfallvermeidung beschäftigten sich die vorherigen Kapitel des theoretischen Hintergrunds mit verschiedenen, in diesem Zusammenhang relevanten Themen. Es wurde herausgestellt, dass die Bearbeitung von FFT während der Fahrt keine Seltenheit darstellt (s. Kapitel 2.1). Unter Bezugnahme auf kognitive Fahrerprozesse, wie die Konzepte der Belastung und Beanspruchung (s. Kapitel 2.2.1) sowie der begrenzten menschlichen Kognitionsressourcen (s. Kapitel 2.2.2), wurde eine mögliche Konsequenz dieser Mehrfachaufgabenbearbeitung, nämlich die driver distraction (s. Kapitel 2.3), herausgearbeitet. Basierend auf Verkehrsstatistiken und der Tatsache, dass Fahrerinnen und Fahrer gemessen an der gesamten Kilometerleistung relativ selten in schwere Unfälle verwickelt sind (ADAC, n.d.a; ADAC, n.d.b), wurde komplementär postuliert, dass sie Fähigkeiten zur Unfallvermeidung zu besitzen scheinen. Diese wurden als regulatives Fahrerverhalten benannt (s. Kapitel 2.4). Aufbauend auf anderen Modellen wurde als ganzheitlicher Ansatz das Arbeitsmodell nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) vorgestellt und ausgearbeitet (s. Kapitel 2.4.1.4). Gemäß dieser Idee erfolgt unter dem Begriff der funktionalen Verhaltensanpassungen eine Verteilung der Kognitionsressourcen zwischen Fahraufgabe und FFT basierend auf der Situationswahrnehmung und -antizipation sowie der subjektiven Fahrleistungsbewertung. Letzterer Punkt wurde aufgrund seiner Zentralität für die Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen ausführlicher dargelegt (Modelle, Ziel- bzw. Schwellenwerte in der Fahrleistung und Einflussfaktoren, s. Kapitel 2.5).

Der Großteil der Arbeiten, der in diesen Kapiteln referenziert wurde, fand im Kontext des nicht-automatisierten Fahrens statt. Allerdings sind Forschungs- und Entwicklungsabteilungen zur Verbesserung des Fahrerlebnisses der Kundinnen und Kunden ständig bestrebt, neue Funktionen zu entwickeln und in Serienfahrzeugen zu implementieren. Im Zuge dessen hat der rasante technologische Fortschritt der letzten Jahre den Weg für assistierte und automatisierte Fahrfunktionen geebnet. Als solches fuhr Mercedes-Benz im Jahr 2013 automatisiert von Mannheim nach Pforzheim (Gold, 2014). Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen und die Rolle des automatisierten

Fahrens für das regulative, unfallvermeidende Fahrerverhalten zu beleuchten, wird das Thema des automatisierten Fahrens in diesem Kapitel näher beschrieben. Zunächst wird in Kapitel 2.6.1 eine Definition des Begriffs der Automatisierung gegeben. Zweitens werden in Kapitel 2.6.2 verschiedene Klassifizierungsschemata von assistierten bzw. automatisierten Fahrfunktionen vorgestellt. Drittens wird in Kapitel 2.6.3 in Bezugnahme auf das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) auf die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten eingegangen.

2.6.1. Definition des Begriffs der Automatisierung. Assistierte und automatisierte Fahrfunktionen rücken derzeit in den Interessensfokus der Automobilindustrie. Damit im Rahmen dieser Arbeit ein einheitliches Verständnis über das Konzept der Automatisierung herrscht, folgt zunächst eine allgemeine Definition des Begriffs. Gemäß dem Deutschen Institut für Normung (DIN IEC 60050-351) kann ein System als „automatisch“ bezeichnet werden, wenn es „unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet“ (Deutsches Institut für Normung, 2014). Diese Definition lässt sich allerdings nur bedingt auf den Automobilkontext anwenden. Hier arbeiten viele Fahrzeugsysteme eigenständig, fallen jedoch nicht in den Bereich des automatisierten Fahrens. Aus diesem Grund strebten diverse Institutionen spezifischere Definitionen für den Automobilkontext an. Diese sind im Folgenden beschrieben.

2.6.2. Klassifikation assistierter und automatisierter Fahrfunktionen. Zur Eingrenzung der eher allgemeinen Definition von Automatisierung, die im vorherigen Kapitel gegeben wurde, haben verschiedene nationale und internationale Institutionen Klassifizierungssysteme für assistierte und automatisierte Fahrsysteme spezifiziert (Gasser et al., 2012; NHTSA, 2013; SAE International, 2018). Eine vollständige Übersicht über diese Klassifikationen findet sich in Tabelle 4. Innerhalb der aktuellen Arbeit wird die SAE Klassifikation (SAE International, 2018) als Referenz verwendet und aus diesem Grund nachfolgend ausführlicher beschrieben.

Innerhalb der SAE Klassifikation erfolgt die Unterscheidung zwischen verschiedenen assistierten und automatisierten Systemen in Abhängigkeit davon, welche Funktionen oder Aufgaben von Fahrerinnen und Fahrern und welche vom System ausgeführt werden. Die relevanten Unterscheidungskriterien sind (a) die Durchführung der Quer- und Längsregelung, (b) die Überwachung der Fahrumgebung, (c) die Rückfallebene in

kritischen Fahrsituationen und (d) der Systemumfang. Insgesamt schlägt die SAE, neben einer Stufe 0 für das nicht-automatisierte Fahren, fünf Automatisierungsstufen vor. Sie reichen von „Driver Assistance“ (Level 1) bis „Full Automation“ (Level 5). Ab Level 3 übernimmt laut dieser Nomenklatur das System die Überwachung der Fahrumgebung und Fahrerinnen und Fahrer können sich mit FFT beschäftigen. Allerdings dürfen Fahrerinnen und Fahrer, wie auch in allen anderen Automatisierungsstufen, jederzeit in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen (fahrerinitiierte Übernahme). Weiterhin sind sie die Rückfallebene an Systemgrenzen. In einem solchen Fall erfolgt eine Rückübergabe der Fahraufgabe vom System an den Fahrer bzw. die Fahrerin (systeminitiierte Deaktivierung bzw. Übernahme). Hierzu gibt das automatisierte System einen zeitlich vorgelagerten Hinweis (takeover request, TOR), der den Fahrer bzw. die Fahrerin auf die Übernahme der Fahraufgabe vorbereiten soll. Erst in höheren Automationsstufen sind Fahrerinnen und Fahrer nicht mehr als Rückfallebene erforderlich (im SAE Level 4 in spezifischen Anwendungsfällen und lediglich in SAE Level 5 während der gesamten Fahrt).

Tabelle 4

Automatisierungslevel (nach Eckstein, 2014; Gasser et al., 2012; NHTSA, 2013; SAE International, 2018)

SAE Level	SAE Name	Ausführung der Fahraufgabe	Überwachung der Fahrumgebung	Rückfallebene	Systemumfang	BAS Level	NHTSA Level
FahrerIn überwacht die Fahrumgebung							
0	No Automation	FahrerIn	FahrerIn	FahrerIn	/	Driver Only	0
1	Driver Assistance	FahrerIn und System	FahrerIn	FahrerIn	Spezifische Anwendung	Assistiert	1
2	Partial Automation	System	FahrerIn	FahrerIn	Spezifische Anwendung	Teil-automatisiert	2
Automatisiertes System („System“) überwacht die Fahrumgebung							
3	Conditional Automation	System	System	FahrerIn	Spezifische Anwendung	Hoch-automatisiert	3
4	High Automation	System	System	System	Spezifische Anwendung	Voll-automatisiert	3/4
5	Full Automation	System	System	System	Gesamte Fahrt		

Diese Tatsache, dass Fahrerinnen und Fahrer ab dem SAE Level 3 zwar nicht mehr für die Überwachung der Fahraufgabe zuständig sind, trotzdem aber die Fahraufgabe übernehmen dürfen (fahrerinitiierte Übernahmen) oder müssen (systeminitiierte Übernahmen), wirft die Frage auf, wie Fahrerinnen und Fahrer es schaffen, solche Eingriffe sicher zu gestalten und eine unfallfreie Fahrt zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel die Implikationen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten näher betrachtet.

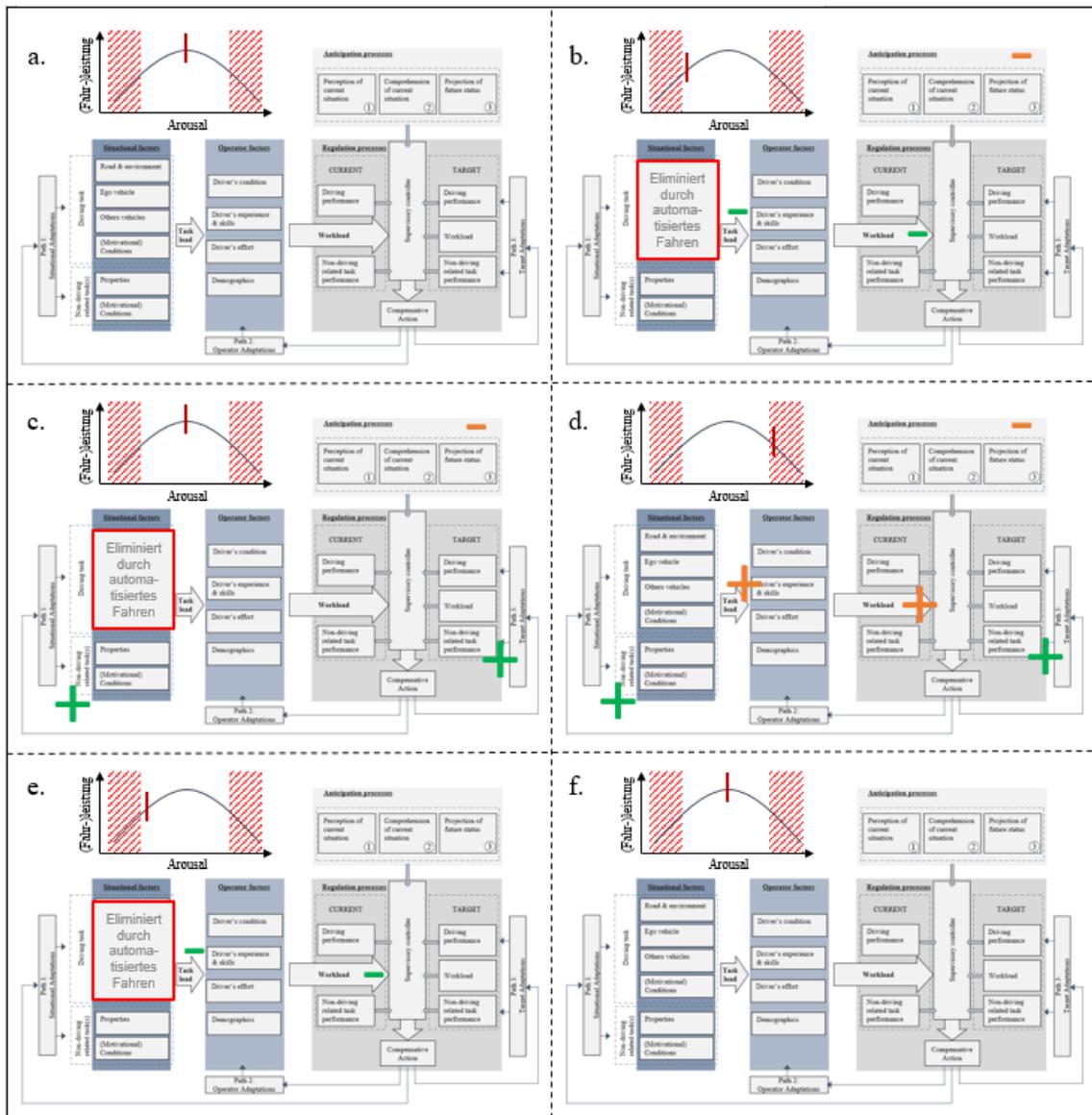


Abbildung 7. Hypothetischer Ablauf der funktionalen Verhaltensanpassungen in Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens nach Voß und Schwalm (2015). Anmerkung. Dargestellt ist eine reduzierte Variante des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sowie die Leistungs-Arousal-Kurve nach Yerkes und Dodson (1908) (oben links je Prozessschritt). Die schraffierten Bereiche der Leistungs-Arousal-Kurve sind die Bereiche, welche von Menschen als aversiv erfahren werden.

2.6.3. Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten.

Verschiedene Autorinnen und Autoren beschäftigten sich mit den möglichen Konsequenzen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten. So griffen Voß und Schwalm (2015) auf das Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen zurück, um theoriebasiert mögliche Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten und die Fähigkeiten zur Unfallvermeidung im Falle von Eingriffen darstellen zu können. Abbildung 7 illustriert in einer sechsschrittigen Sequenz (a bis f), welche Effekte dies sein könnten. Pro Sequenzschritt ist in dieser Abbildung eine reduzierte Version des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen ohne die Spezifikationen der einzelnen Komponenten abgebildet. Darüber hinaus beinhaltet jeder Sequenzschritt ein Diagramm zum Verhältnis des fahrerseitigen Arousallevels (Erregungslevels) und der (Fahr-) Leistung gemäß dem Yerkes-Dodson-Law (Yerkes & Dodson, 1908). In den folgenden Unterkapiteln werden die sechs Sequenzschritte näher betrachtet und durch Literatur im Kontext des automatisierten Fahrens unterstützt.

2.6.3.1. Reduktion des Arousallevels und des Situationsbewusstseins. Wie in Kapitel 2.4 diskutiert wurde, scheinen Fahrerinnen und Fahrer im nicht-automatisierten Fahren funktionale Verhaltensanpassungen im Sinne von Fähigkeiten zur Unfallvermeidung zu besitzen, da Unfälle auch im Mehrfachaufgabenkontext gemessen an der Gesamtkilometerzahl relativ selten passieren. Spezifischer ausgedrückt verteilen Fahrerinnen und Fahrer in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung ihre (kognitiven) Ressourcen so, dass sie ein optimales Arousallevel haben, welches wiederum eine maximale (Fahr-) Leistung ermöglicht. Gemäß Teigen (1994, in Bezugnahme auf das Yerkes-Dodson-Law (Yerkes & Dodson, 1908)) stellt ein mittleres Arousallevel dieses Optimum dar. Dieser Zustand eines Gleichgewichts im nicht-automatisierten Fahren ist in Schritt a der Abbildung 7 dargestellt.

Im Vergleich hierzu führt das automatisierte Fahren dazu, dass Fahrerinnen und Fahrer nicht mehr dauerhaft in die Fahraufgabe involviert sein müssen (ab SAE Level 3, ab dem das automatisierte System neben der Ausführung der Fahraufgabe auch für die Überwachung der Fahrsituation zuständig ist, s. Kapitel 2.6.2). Im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) fallen somit die Situationsfaktoren der Fahraufgabe weg. In Konsequenz reduzieren sich sowohl die Belastung als auch die resultierende Beanspruchung (s. Schritt b in Abbildung 7). Diese Tatsache hat

weitreichende Auswirkungen auf die fahrerseitige Kognition. So nimmt in einer automatisierten Fahrt nach ca. 20-30 min die Vigilanz ab, sodass selten auftretende Reize, wie z. B. Warnschilder, über einen längeren Zeitraum schlechter detektiert werden (Buld, Tietze & Krüger, 2005; Warm, Dember & Hancock, 1996). Andere Autoren formulierten diese kognitive Auswirkung als das Absinken des fahrerseitigen Arousallevels (s. Schritt b in Abbildung 7) (Young & Stanton, 2002). Hieraus kann wiederum eine Reduktion des fahrerseitigen Situationsbewusstseins, welches in Kapitel 2.4.1.1 definiert wurde und welches eine zentrale Voraussetzung für die adäquate Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen darstellt (s. Kapitel 2.4.1.4), entstehen (Endsley & Kiris, 1995) (s. Schritt b in Abbildung 7).

2.6.3.2. FFT-Bearbeitung im automatisierten Fahren. Komplementär zu der Tatsache eines reduzierten Arousallevels im automatisierten Fahren (s. Schritt b in Abbildung 7) scheinen Menschen grundsätzlich die Motivation zu besitzen, das Arousallevel auf einem mittleren Niveau halten zu wollen (Bourne & Ekstrand, 2001). Aus diesem Grund tendieren sie dazu, sich im Rahmen einer automatisierten Fahrt mit FFT zu beschäftigen (z. B. Griffiths & Gillespie, 2005; Jamson, Merat, Carsten & Lai, 2013). Im Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen ist dies über die Erhöhung der Ziele und Aktivität der FFT dargestellt (s. Schritt c in Abbildung 7). Über diese Erhöhung gleicht sich das vorherige Minus in der Belastung und Beanspruchung aus und das Arousallevel steigt wiederum auf ein mittleres, ideales Level an.

Studien konnten dieses in Schritt c der Abbildung 7 dargestellte Zusammenspiel belegen. Beispielsweise führt ein SAE Level 2 System im Vergleich zu einem Level 1 System zunächst zu einem niedrigeren Arousallevel und in Konsequenz zu erhöhten Blickabwendungen von der Fahraufgabe und einer verstärkten Beschäftigung mit FFT (Llaneras, Salinger & Green, 2013). Carsten, Lai, Barnard, Jamson und Merat (2012) fanden darüber hinaus, dass eine automatisierte Querführung eher zu einer erhöhten FFT-Bearbeitung führt als eine automatisierte Längsführung.

2.6.3.3. Herausforderung von Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens. Diese zwei Auswirkungen des automatisierten Fahrens, nämlich ein reduziertes Situationsbewusstsein (s. Kapitel 2.6.3.1) und eine erhöhte FFT-Bearbeitung (s. Kapitel 2.6.3.2) können insbesondere bis zum SAE Level 3 (und im erweiterten Sinne auch

noch im SAE Level 4) zu Problemen führen, da Fahrerinnen und Fahrer derzeit auf gesetzlicher Grundlage jederzeit in die Fahrzeugführung eingreifen dürfen und außerdem im Falle kritischer Fahrsituationen oder an Systemgrenzen noch immer als die benötigte Rückfallebene gesehen werden und die Fahraufgabe wieder übernehmen müssen. Unter Berücksichtigung der nachfolgenden Überlegungen ist jedoch fraglich, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer dieser Anforderung gerecht werden können.

Gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sind die Wahrnehmung und Antizipation der Fahrsituation notwendige Voraussetzungen für die adäquate Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen zur Unfallvermeidung. Ist ein solches Situationsbewusstsein nicht gegeben bzw. nur in reduziertem Maße vorhanden, ist es möglich, dass eine der Fahrsituation angemessene Verteilung der kognitiven Ressourcen zwischen Fahraufgabe und FFT nicht erfolgen kann. Im Falle einer Übernahme-situation, in welcher die Situationsfaktoren der Fahraufgabe wieder hinzukommen und somit die Belastung und Beanspruchung erhöht werden, würde die FFT-Aktivität nicht angepasst werden (s. Schritt d in Abbildung 7). Eine zu erwartende Konsequenz wäre der Anstieg des Arousallevels auf ein hohes, aversives Niveau.

Basierend auf der in Kapitel 2.6.3.1 postulierten Annahme, dass ein mittleres Arousallevel die besten Leistungsmöglichkeiten bietet (Teigen, 1994 in Bezugnahme auf das Yerkes-Dodson-Law (Yerkes & Dodson, 1908)), wären in einem solchen Fall folglich Leistungseinschränkungen bzw. -einbußen zu erwarten (Radlmayr & Bengler, 2015). Diese Rollenveränderung des Fahrers bzw. der Fahrerin von einer aktiv handelnden hin einer überwachenden Person (z. B. Schömig, Hargutt, Neukum, Petermann-Stock & Othersen, 2015) und die damit verbunden möglichen negativen Konsequenzen auf die Leistungsfähigkeit (u. a. die Reduktion des Situationsbewusstseins) werden als das out-of-the-loop Problem diskutiert (Endsley & Kiris, 1995; Kaber & Endsley, 1997).

In Bezug auf diese Problematik und basierend auf der Forderung nach Forschung hinsichtlich der sicheren Rückholung von Fahrerinnen und Fahrern vom (hoch-) automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren (Radlmayr & Bengler, 2015) existiert bereits eine breite empirische Literaturbasis zu fahrerseitigen Übernahmeleistungen in Verbindung mit der Bearbeitung von FFT. So analysierten Damböck, Weißgerber, Kienle und Bengler (2013) im Rahmen einer Simulatorstudie die Auswirkungen verschiedener Automatisierungslevel bei gleichzeitiger Bearbeitung einer FFT. Je höher

das Automatisierungslevel war, desto geringer war zwar die Beanspruchung der Versuchspersonen, allerdings resultierten auch schlechtere Reaktionszeiten in der Fahraufgabe. Auch in anderen Arbeiten wurden die fahrerseitigen Reaktionen untersucht. So verlängert sich beispielsweise die Bremsreaktionszeit im hochautomatisierten Fahren im Vergleich zu einer nicht-automatisierten Fahrt um 2.4 s (Young & Stanton, 2007). Weiterhin führt ein höheres Automationslevel nicht nur zu langsameren, sondern auch zu schlechteren Fahrerreaktionen (Shen & Neyens, 2014; Stanton, Young & McCaulder, 1997; Strand, Nilsson, Karlsson & Nilsson, 2014). Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Merat und Jamson (2009). Sie verglichen die Fahrerreaktionen zwischen automatisiertem und nicht-automatisiertem Fahren in kritischen Verkehrsszenarien, die eine Bremsung erforderten. Die Bremsreaktionen stellten sich im nicht-automatisierten Fahren als besser heraus. Es scheint jedoch nicht nur die Längsführung negativ beeinflusst zu werden. Bei einer automatisierten Fahrt mit zusätzlicher FFT fiel in einer Studie von Merat, Jamson, Lai und Carsten (2012) auch die Querführung (Spurwechsel) im Rahmen einer Übernahme-situation im Vergleich zu einer nicht-automatisierten Fahrt schlechter aus. Merat, Jamson, Lai, Daly und Carsten (2014) diskutierten allgemeiner, dass die Übernahmeleistung von Fahrerinnen und Fahrern von der Vorhersehbarkeit einer Übernahme abhängt. Hinsichtlich der Art von FFT konnten Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid und Bengler (2014) zeigen, dass eine visuell-motorische FFT den stärksten negativen Einfluss auf die fahrerseitige Übernahmeleistung hatte.

2.6.3.4. Idee funktionaler Verhaltensanpassungen in Übernahme-situationen des automatisierten Fahrens. Vergleichbar zum Phänomen der driver distraction im nicht-automatisierten Fahren (s. Kapitel 2.3) scheint also auch im automatisierten Fahren die Bearbeitung von FFT negative Auswirkungen auf die Fahr- bzw. konkreter auf die Übernahmeleistung haben zu können. Im Kontext des nicht-automatisierten Fahrens scheint es allerdings regulatives Fahrerverhalten (konzeptualisiert z. B. über die funktionalen Verhaltensanpassungen von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015)) zu geben, welches Fahrerinnen und Fahrern oftmals ermöglicht, diese negativen Konsequenzen abzuwenden und eine sichere Fahrleistung zu garantieren (s. Kapitel 2.4). Deshalb erscheint es schlüssig, dass ein ähnlicher Mechanismus auch im automatisierten Fahren bzw. genauer in Übernahme-situationen vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren verfügbar ist. Voß und Schwalm (2015) konkretisierten diese

Annahme in den Schritten e und f der Abbildung 7 und konnten den hypothetischen Ablauf dieser Schritte bereits initial verifizieren. Eine umfassende empirische Prüfung ist allerdings noch ausstehend.

Gemäß Voß und Schwalm (2015) könnten die funktionalen Verhaltensanpassungen in Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens als umgekehrter Prozess zu den Schritten a-c der Abbildung 7 stattfinden. Im Sinne eines proaktiven Mechanismus reduzieren Fahrerinnen und Fahrer nach einem TOR in Vorbereitung auf eine Übernahme die Ziele und die Aktivität in den FFT. Es findet ein Wiederaufbau des Situationsbewusstseins und eine Reduktion von Belastung sowie Beanspruchung statt. Ein hieraus resultierendes Unterarousal wird kurzfristig in Kauf genommen (s. Schritt e in Abbildung 7), da in der anschließenden Übernahmesituation vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren die Situationsfaktoren der Fahraufgabe wieder hinzukommen. Die Belastung und Beanspruchung erhöhen sich und das Arousal sowie die Leistung (in diesem Fall die Übernahmeleistung) kehren in einen optimalen Bereich zurück (s. Schritt f in Abbildung 7).

Damit der Prozess der Schritte e und f erfolgreich ablaufen kann, d. h., damit Fahrerinnen und Fahrer es schaffen, eine erfolgreiche und sichere Übernahme zu gewährleisten, muss ausreichend Zeit zur Verfügung stehen. Ersten Aufschluss für das benötigte Zeitbudget zwischen TOR und Übernahme können empirische Studien geben. So fanden z. B. Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr und Mergl (2013), dass FFT mit einem hohen Beanspruchungsniveau TOR-Zeiten von bis zu zehn Sekunden erfordern. Dahingegen scheinen kürzere TOR-Zeiten (vier Sekunden) ausreichend zu sein, wenn das Übernahmeszenario eine geringe Komplexität aufweist (Damböck, Bengler, Farid & Tönert, 2012). Kürzere TOR-Zeiten führen gemäß Gold, Damböck, Lorenz und Bengler (2013) zwar zu schnelleren, jedoch aber schlechteren Fahrerreaktionen. Die gleichen Autoren postulierten weiterhin, dass nicht nur die TOR-Zeit, sondern auch die TOR-Salienz für den Wiederaufbau des fahrerseitigen Situationsbewusstseins und somit für die Übernahmequalität relevant sind. Eine Studie, die diese Aussage unterstützt, stammt von Naujoks, Mai und Neukum (2014). Sie verglichen im dynamischen Fahrsimulator eine rein visuelle mit einer akustisch-visuellen Übernahmeaufforderung hinsichtlich der Effekte auf die Übernahmequalität. Es zeigte sich, dass der multimodale TOR einen positiven Einfluss auf die Hands-on Zeiten sowie auf die Fahrleistung in der Querführung hatte. Als Zusammenfassung dieser verschiedenen Studien kann die Arbeit von

Gold (2014) gesehen werden, in der geschlossen wird, dass die Komplexität der Situation, die ausgeübte FFT, die TOR-Modalität sowie die Gewöhnung an die Systembedienung Einfluss auf das fahrerseitige Übernahmeverhalten haben kann.

3. Forschungsgegenstand und wissenschaftliche Fragestellungen

Das vorangegangene Kapitel 2 bietet einen detaillierten Überblick über bestehende Literatur, die Relevanz für die aktuelle Arbeit und deren allgemeine Zielsetzung besitzt. Diese Literaturübersicht macht deutlich, dass bereits viele Autorinnen und Autoren dezidierte Forschung in den Themenfeldern des regulativen Fahrerverhaltens, der subjektiven Fahrleistungsbewertung und des automatisierten Fahrens betrieb. Es lassen sich jedoch auch offene Forschungsfelder im Themengebiet der aktuellen Arbeit identifizieren. Auf diese soll in den folgenden Abschnitten eingegangen (Kapitel 3.1) und basierend hierauf die spezifischen wissenschaftlichen Fragestellungen der aktuellen Arbeit abgeleitet werden (Kapitel 3.2). Den Abschluss des Kapitels stellt eine kurze Definition zentraler Begriffe bezüglich dieser Fragestellungen dar (Kapitel 3.3).

3.1. Offene Forschungsfelder

Verkehrsstatistiken zeigen, dass Fahrerinnen und Fahrer im Verlauf einer Fahrt dazu neigen, FFT zu bearbeiten (Dingus et al., 2006; Huemer & Vollrath, 2012). Diese Tatsache könnte in Verbindung mit dem Wissen über die begrenzten kognitiven Ressourcen (Kahneman, 1973; Wickens, 2008) den Schluss nahelegen, dass im fahrbezogenen Mehrfachaufgabenkontext mit starken negativen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit zu rechnen ist. Allerdings sind Fahrerinnen und Fahrer nur relativ selten in schwere Unfälle verwickelt (ADAC, n.d.b). Folglich scheinen sie also Fähigkeiten zum Garantieren einer sicheren Fahrleistung zu besitzen. Gemäß Kapitel 2.4 bestehen diese Fähigkeiten darin, dass Fahrerinnen und Fahrer in Abhängigkeit des Fahrkontexts die verfügbaren Ressourcen regulieren und die Bearbeitung von FFT je nach der Belastung in der Fahraufgabe (proaktiv) anpassen.

Die in Kapitel 2 reflektierte Literatur zeigt, dass es bereits diverse Studien und Modelle gibt, die sich mit der Untersuchung dieser Fähigkeiten beschäftigen. Ein Modell, das versucht, die verschiedenen theoretischen Ansätze und Stränge miteinander zu verknüpfen, und welches im Rahmen der vorliegenden Dissertation im Kapitel 2.4.1.4 weiter ausgearbeitet wurde, ist das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015). Es fasst die regulativen Fähigkeiten von Fahrerinnen und Fahrern zur Unfallvermeidung unter dem Konzept der funktionalen Verhaltensanpassungen zusammen. Aufgrund des ganzheitlichen Ansatzes, den dieses Modell verfolgt, ist es der inhaltliche zentrale Referenzpunkt der aktuellen Arbeit. Es postuliert diverse Komponen-

ten der funktionalen Verhaltensanpassungen, die zusammen die Möglichkeit bieten, das Fahrerverhalten zu strukturieren. Wie in Kapitel 2 berichtet, gibt es für einige Komponenten des Arbeitsmodells bereits fundierten empirischen Nachweis (z. B. kompensative Anpassungen in der Fahraufgabe wie z. B. Geschwindigkeitsreduktionen, s. Kapitel 2.4.2). Andere Aspekte hingegen sind noch nicht bzw. nicht in ihrer Gesamtheit auch vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen in Richtung des automatisierten Fahrens diskutiert. So wird beispielsweise der supervisory controller des Arbeitsmodells als kognitive Black Box verstanden (s. Kapitel 2.4.1.4). Seine konkrete Gestaltung und Funktionsweise bzw. die seiner angegliederten Komponenten ist noch zu untersuchen. In den folgenden Unterkapiteln wird auf drei offene Forschungsfelder eingegangen, die in diesem Zusammenhang zentral erscheinen.

3.1.1. Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren. Insgesamt bewegte sich ein Großteil der bestehenden Forschung zum regulativen Fahrerverhalten im Kontext des nicht-automatisierten Fahrens (s. Kapitel 2.4.2; z. B. Platten et al., 2013; 2014). Die aktuellen Entwicklungen assistierter und automatisierter Fahrfunktionen (s. Kapitel 2.6) bedürfen in diesem Zusammenhang jedoch verstärkter Beachtung. Voß und Schwalm (2015, s. Kapitel 2.6.3) kamen dieser Aufforderung initial nach und beschäftigten sich mit den Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten. Basierend auf der Annahme, dass eine automatisierte Fahrt zu einem reduzierten Arousallevel und in Folge zu einem reduzierten Situationsbewusstsein führt (z. B. Endsley & Kiris, 1995), erörterten sie theoriebasiert die Frage, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer ihre funktionalen Verhaltensanpassungen, die u. a. auf der Situationswahrnehmung und -antizipation beruhen, im Kontext des automatisierten Fahrens überhaupt zur Verfügung stehen. Sie kamen zu dem Schluss, dass Fahrerinnen und Fahrer auch im automatisierten Fahren auf die funktionalen Verhaltensanpassungen zur Unfallvermeidung zurückgreifen könnten. Allerdings ist eine umfassende empirische Prüfung dieser von Voß und Schwalm (2015) gemachten Annahme noch zu leisten. Ein detailliertes Wissen könnte die Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren unterstützen und somit einen wichtigen Beitrag zur Unfallvermeidung und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten.

3.1.2. Spezifikation der subjektiven Fahrleistungsbewertung und deren Relevanz im automatisierten Fahren. Neben diesem Transfer der Auslösung bzw. Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen ins automatisierte Fahren ist eine der Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015), die weiterer empirischer Forschung bedarf, die subjektive Fahrleistungsbewertung. Die Zielwerte in der subjektiven Fahrleistungsbewertung bzw. ein Abweichen von diesen stellen gemäß dem Arbeitsmodell einen der zentralen auslösenden Faktoren der funktionalen Verhaltensanpassungen dar (s. Kapitel 2.4.1.4). Zwar existieren diverse Modellansätze hinsichtlich dieser Thematik, jedoch fokussieren sie sich zumeist auf die Längsführung (s. Kapitel 2.5.1). Ein ganzheitliches Modell der subjektiven Fahrleistungsbewertung, welches Längs- und Querverführung miteinander verbindet, scheint nach bestem Wissen der Autorin aktuell zu fehlen. Fortführend existiert derzeit keine Messmethodik, die die Objektivierung bzw. Quantifizierung der subjektiven Fahrleistungsbewertung als ganzheitliches Konstrukt ermöglicht. Auch die Schwellen- bzw. Zielwerte subjektiv akzeptierter Trajektorien sind derzeit zumeist für die Längsführung lokalisiert (s. Kapitel 2.5.2, z. B. Siebert et al., 2017). Hinsichtlich der Querverführung fokussieren sich die empirischen Arbeiten hauptsächlich auf die eigene Fahrspurwahl z. B. beim Überholen (s. Kapitel 2.5.2, z. B. Dozza et al., 2016). Als weiterer offener Punkt zur subjektiven Fahrleistungsbewertung sind deren potenzielle Einflussfaktoren zu nennen. In Kapitel 2.5.3 wurde die Idee diskutiert, dass es dieselben Faktoren sind, die auch für die Unfallverursachung eine Rolle spielen, empirische Belege hierzu fehlen allerdings.

Vor allem die beiden letztgenannten Punkte, die Zielwerte subjektiv akzeptierter Trajektorien und die Einflussfaktoren auf die subjektive Fahrleistungsbewertung, könnten auch für das automatisierte Fahren eine große Relevanz haben. Ein dezidiertes Wissen, wie diese Schwellenwerte im automatisierten Fahren gestaltet sind und inwiefern sie durch Personen- oder Situationsfaktoren beeinflusst werden, könnte helfen, automatisierte Fahrfunktionen an Nutzerpräferenzen anzupassen. Durch das Einhalten der subjektiv akzeptierten Fahrleistungsbereiche in der Trajektorienplanung könnten der Komfort und somit die Akzeptanz automatisierter Fahrfunktionen gewährleistet werden.

3.1.3. Subjektive Fahrleistungsbewertung als Auslöser funktionaler Verhaltensanpassungen und Bedeutung dieses Zusammenhangs für das automatisierte Fahren. Neben der subjektiven Fahrleistungsbewertung an sich ist es als weitere Kom-

ponente des Arbeitsmodells der theoretische Zusammenhang zwischen dem Überschreiten der subjektiven Fahrleistungsschwellen und dem Auslösen funktionaler Verhaltensanpassungen, der in der Empirie zwingend überprüft werden muss. Bisherige Studien konnten vor allem Verhaltensanpassungen in Abhängigkeit der Situationsantizipation (s. Kapitel 2.4.2, z. B. Platten et al., 2014) nachweisen. Im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) ist es auch denkbar, dass Fahrerinnen und Fahrer im Falle eines Ungleichgewichts zwischen Ist- und Zielwerten in der Fahrleistung die FFT-Bearbeitung zur Freigabe kognitiver Ressourcen reduzieren und diese für das Lösen der Fahraufgabe aufwenden. Dieser Zusammenhang zwischen den Zielwerten in der Fahrleistung und der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen könnte vor allem für das automatisierte Fahren von großer Praxisrelevanz sein. Sollte ein automatisiertes System nicht den subjektiven Anforderungen an eine Trajektorie entsprechen, bestünde die Möglichkeit, dass Fahrerinnen und Fahrer die Trajektorie nicht nur als negativ bewerten, sondern dass sie außerdem ihre funktionalen Verhaltensanpassungen aktivieren und in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen. Eine mangelnde Systemakzeptanz wäre eine mögliche Folge. Unter der zusätzlichen Annahme, dass Fahrerinnen und Fahrer im automatisierten Fahren je nach Automatisierungsgrad nicht vollständig in die Fahraufgabe involviert sind und nicht alle kontextrelevanten Informationen wahrnehmen (s. Annahmen von Voß und Schwalm (2015); Kapitel 2.6.3), ist es darüber hinaus möglich, dass diese Eingriffe sicherheitskritisch wären. In diesem Fall müsste nicht nur die Komfort- sondern auch die Sicherheitsrelevanz der Fahrleistungsschwellen diskutiert werden.

3.2. Wissenschaftliche Fragestellungen der aktuellen Arbeit

Aufbauend auf den im vorherigen Kapiteln identifizierten offenen Forschungsfeldern sind die Ziele und somit der Forschungsgegenstand der aktuellen Arbeit die empirische Ausarbeitung der in Kapitel 3.1 diskutierten Komponenten der funktionalen Verhaltensanpassungen zur weiteren Entwicklung des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sowie die Untersuchung der Verfügbarkeit und Ausprägung der funktionalen Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation in Summe sechs empirische Studien durchgeführt. Deren wissenschaftliche Fragestellungen und die zu ihrer Beantwortung gewählte Herangehensweise sind im Folgenden beschrieben. Zusätzlich bein-

hältet Abbildung 8 eine Übersicht, welche Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) jeweils in den Studien untersucht wurden. Hierzu ist das Arbeitsmodell aus Übersichtszwecken ohne die Spezifikationen der einzelnen Komponenten dargestellt. Die untersuchten Elemente sind pro Studie farblich hervorgehoben. Die spezifischen Hypothesen der einzelnen empirischen Studien werden in der Dissertation in den jeweiligen Kapiteln (Kapitel 4-9) abgeleitet und vorgestellt.

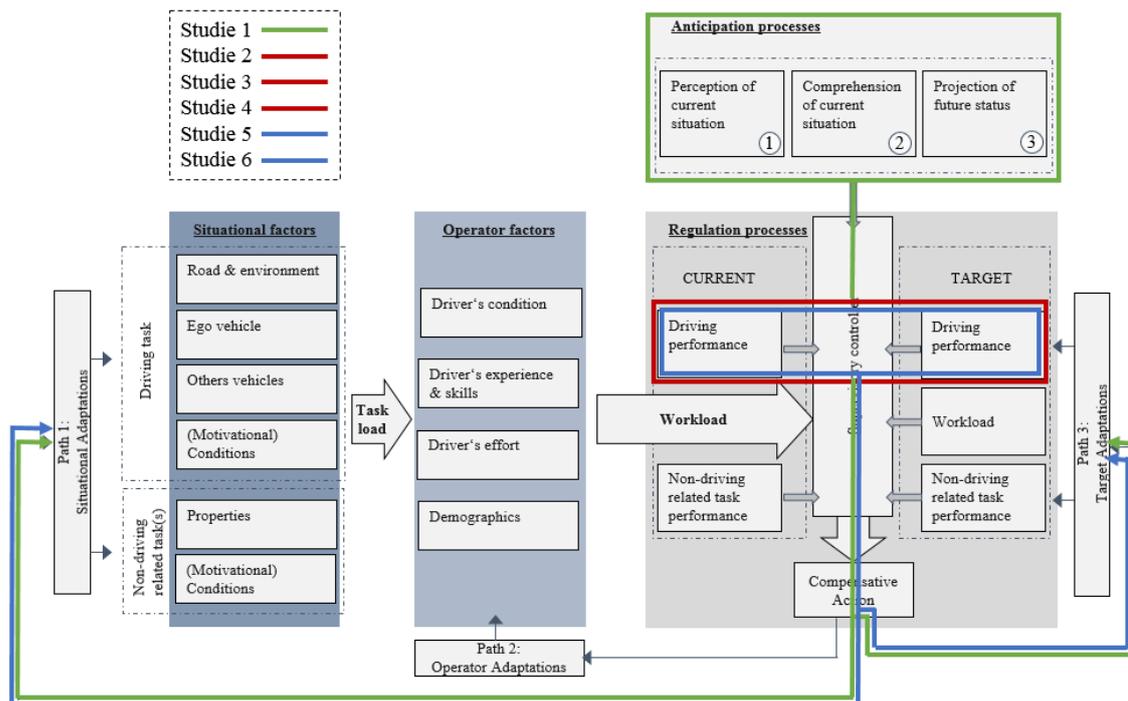


Abbildung 8. Reduziertes Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen mit Hervorhebungen der in den Studien der Arbeit untersuchten Komponenten

3.2.1. Studie 1. Das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postuliert, dass Fahrerinnen und Fahrer in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung und -antizipation funktionale Verhaltensanpassungen vor allem auf den Pfaden 1 und 3 vornehmen werden. Da diese Annahme einen der zentralen Pfeiler des Modells darstellt, beschäftigte sich Studie 1 basierend auf den in Kapitel 3.1 gemachten Überlegungen mit dieser Thematik. Im Sinne einer konfirmatorischen Überprüfung bestehender empirischer Studien wurde im Rahmen einer Simulatorstudie die Fragestellung untersucht, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer tatsächlich den Situationsverlauf in einer dynamischen, d. h. sich verändernden, Fahrsituation antizipieren und ihr Verhalten hierauf anpassen (s. Abbildung 8, grüne Hervorhebung). Bei der Auswahl der sich verän-

dernden Fahrsituation wurde den in Kapitel 2.6 erwähnten aktuellen Entwicklungen des automatisierten Fahrens Rechnung getragen. Wie im Kapitel 2.6.2 berichtet, erfordern aktuelle automatisierte Systeme in Abhängigkeit ihres Systemumfangs (bis zu SAE Level 3), dass Fahrerinnen und Fahrer jederzeit – trotz teilweise möglicher Abwendung von der Fahraufgabe (SAE Level 3) – bereit sind, die Fahraufgabe zu übernehmen. Insofern stellt eine Übernahme vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren eine sich verändernde Fahrsituation dar. Fahrerinnen und Fahrer müssen innerhalb kürzester Zeit wieder den Loop der Fahraufgabe betreten. Folglich erlaubte die Studie 1 nicht nur die konfirmatorische Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation, sondern kam zeitgleich der Zielsetzung der aktuellen Arbeit nach, die Verfügbarkeit bzw. Gestaltung der funktionalen Verhaltensanpassungen im Kontext des automatisierten Fahrens gemäß den Überlegungen von Voß und Schwalm (2015, s. Kapitel 2.6.3) zu prüfen (erstes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.1). In Kapitel 4 sind die Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu dieser empirischen Studie 1 berichtet.

3.2.2. Studie 2. Ein zweites Element der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015), welches weiterer Ausarbeitung bedarf, ist die subjektive Fahrleistungsbewertung (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Da nach bestem Wissen der Autorin ein ganzheitliches Modell zur Konzeptualisierung derselben fehlt, steht dies im Fokus von Studie 2 (Abbildung 8, rote Hervorhebung). Es wurde die Fragestellung untersucht, wie die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, die sowohl Längs- als auch Querregelung umfasst, konzeptualisiert und messbar gemacht werden kann. Aufbauend auf den in Kapitel 2.5.1 vorgestellten Arbeiten wurde deshalb das Konstrukt der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung im Rahmen einer Literaturrecherche, Online-Studie und eines Expert-Card Sortings generiert und in einer angeschlossenen weiteren Online-Studie diskriminanz- und faktorenanalytisch geprüft. Abschließend wurde basierend auf den erlangten Ergebnissen eine Messmethodik abgeleitet. Kapitel 5 beinhaltet die Methoden, Ergebnisse der einzelnen Schritte sowie die angeschlossene Diskussion der erlangten Erkenntnisse.

3.2.3. Studie 3. Im Kontext des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) ist hinsichtlich der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewer-

tung nicht nur die Gestaltung des Konstrukts der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung wichtig (s. Studie 2), sondern vor allem auch, gegen welche Vergleichswerte diese Subjektivbewertung stattfindet. Das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) bezeichnet diese Vergleichswerte als Zielwert(e) der Fahrleistung und diskutiert sie als Auslöser kompensativer Handlungen. Ein Wissen über die Lokalisation der Fahrleistungszielwerte ermöglicht in diesem Zusammenhang folglich ein Verständnis darüber, wann Fahrerinnen und Fahrer im Sinne des Arbeitsmodells dazu neigen, ihre funktionalen Verhaltensanpassungen zu aktivieren. Nach aktuellem Stand ist die bestehende Forschung in diesem Bereich allerdings begrenzt und bezieht sich eher auf die Längsführung. Weiterhin sind bislang potenzielle Einflussfaktoren auf die subjektive Fahrleistungsbewertung unzureichend untersucht (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Mit dem in Studie 2 erlangten Wissen ausgestattet, untersuchte die Studie 3 deshalb die Fragestellung, welche Trajektorienbereiche in der Querregelung in Abhängigkeit spezifischer Personen- und Situationsfaktoren als subjektiv angemessen bewertet werden (Abbildung 8, rote Hervorhebung). Es wurden im Rahmen einer Online-Studie über die Darbietung von auf Video aufgezeichneten, simulierten Fahrten Schwellenwerte akzeptierter Trajektorienbereiche für den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs bestimmt. Vor dem Hintergrund des automatisierten Fahrens wurde ein erster Bezug der Ergebnisse zu diesem Themenfeld hergestellt. Die Studie wurde als Teil der Dissertation im Sinne einer Vorveröffentlichung bereits von Voß, Keck und Schwalm (2018) publiziert. Kapitel 6 umfasst einen Überblick über diese Studie 3.

3.2.4. Studie 4. In Fortführung zu Studie 3, in der ein erster Bezug der subjektiven Fahrleistungsbewertung bzw. der -zielwerte zum automatisierten Fahren hergestellt wurde, lag der Fokus der Studie 4 vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen assistierter und automatisierter Fahrfunktionen auf der subjektiven Schwellenwertbestimmung für den Lateralversatz im automatisierten Fahren (Abbildung 8, rote Hervorhebung). Es wurde die Fragestellung untersucht, welche Lokalisation die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes im automatisierten Fahren in Abhängigkeit spezifischer Situationsfaktoren besitzen (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Die grundlegende Methodik der Studie 3 (Online-Studie mit Darbietung von auf Video aufgezeichneten, simulierten Fahr-

ten) wurde auch für diese Studie 4 übernommen. In Kapitel 7 sind die Methodik, die Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen dargelegt.

3.2.5. Studie 5. Studie 5 beinhaltete eine weitere Fahrsimulationsstudie, die Fragestellungen hinsichtlich zweier Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) im Kontext des automatisierten Fahrens untersuchte, die gemäß Kapitel 3.1 weiterer Ausarbeitung bedürfen. In den Studien 3 und 4 fand die Bestimmung der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in Online-Studien statt. Deshalb untersuchte Studie 5 zum einen die Fragestellung, inwiefern sich die in einer Online-Studie bestimmten Schwellenwerte im realistischeren Szenario einer Fahrsimulation bestätigen lassen und somit die Methode der Studien 3 und 4 eine valide, aufwandsreduzierte Alternative darstellt (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Diese Verifikation fand im Hinblick auf die in Studie 4 bestimmten Schwellenwerte statt, da hier die Schwellenwerte konkret für das automatisierte Fahren ermittelt wurden.

Die andere Fragestellung beschäftigte sich mit dem bisher noch unzureichend untersuchten Zusammenhang der subjektiven Fahrleistungsbewertung und den funktionalen Verhaltensanpassungen (drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3). Da die subjektive Fahrleistungsbewertung ein zentrales Element des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) darstellt, ist zu erwarten, dass die in Studie 1 untersuchten Verhaltensanpassungen nicht nur im Rahmen einer sich verändernden Fahrsituation, sondern auch in Abhängigkeit der subjektiven Trajektorienwahrnehmung im Falle von Abweichungen von den Fahrleistungszielwerten auftreten. Vergleichbar zu Studie 1 fand die Untersuchung dieses Zusammenhangs in einem ausgewählten Szenario des automatisierten Fahrens statt. Somit konnte erneut beiden Zielsetzungen der aktuellen Arbeit, nämlich der Ausarbeitung der Komponenten des Arbeitsmodells sowie der Einbettung dieser in das automatisierte Fahren, nachgekommen werden. Es konnte geprüft werden, ob die von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3) gemachten Annahmen zur Aktivierung funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren auch in diesem Fall zutreffen. Diese Idee wurde unter der Fragestellung zusammengefasst, ob die für den Lateralversatz bestimmten Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung bzw. deren Überschreiten im automatisierten Fahren eine Handlungsrelevanz im Sinne der Aktivierung der funktionalen Ver-

haltensanpassungen besitzen (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Ein Wissen, ob die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung tatsächlich eine Handlungsrelevanz besitzen, ist insbesondere auch für die Auslegung automatisierter Systeme relevant. Gemäß den Überlegungen aus Kapitel 3.1.3 ermöglicht dieses Wissen eine Aussage darüber, ob die Fahrleistungsschwellen im automatisierten Fahren nicht nur eine Komfort- (geringe Akzeptanz einer automatisierten Fahrt) sondern auch eine Sicherheitsrelevanz (Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung trotz fehlender Involvierung in die Fahraufgabe) haben. Im zweiten Falle wäre zu klären, ob automatisierte Systeme zur Vermeidung von komfort- und sicherheitskritischen Eingriffen über adaptive Mechanismen verfügen sollten, die die Trajektorie jederzeit in einem subjektiv angemessenen Bereich halten. Die Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen beider Fragestellungen sind in Kapitel 8 berichtet.

3.2.6. Studie 6. Eine letzte Studie der vorliegenden Dissertation, Studie 6, diente der Verifikation der in den vorherigen Studien gewonnenen Ergebnisse im Realversuch. Auch hier wurden zwei Fragestellungen verfolgt, die Aufschluss über die Gültigkeit der Annahmen des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) in einer Realfahrt geben sollten.

Zum einen wurde die Fragestellung untersucht, ob in Fortführung zu Studie 5 die im Rahmen der Online-Studie (Studie 4) bestimmten Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes, neben der Fahrsimulation auch im Realversuch bestätigt werden können und somit eine Praxisrelevanz besitzen (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Eine erfolgreiche Überprüfung würde bestätigen, dass Fahrerinnen und Fahrer auch in einer Realfahrt des automatisierten Fahrens die Trajektorie des Fahrzeugs subjektiv bewerten und dass die Methodik der Online-Studie (Studie 4) ein valides, aufwandsreduziertes Instrument darstellt.

Zum anderen wurde die Fragestellung geprüft, inwiefern die im Fahrsimulator (Studie 5) untersuchte Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes auch im Realversuch bestätigt werden kann (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Eine erfolgreiche Überprüfung würde auch hier bedeuten, dass der in Studie 5 verwendete Aufbau (Fahrsimulator) eine valide Methodik ist und dass die Schwellenwerte bei der Auslegung automatisierter Fahrfunktionen berücksichtigt werden sollten, um eine subjektiv angemessen wahrge-

nommene Fahrt zu gewährleisten und um potenziell sicherheitskritische Eingriffe durch Fahrerinnen und Fahrer zu vermeiden. Die Methoden, Ergebnissen und Schlussfolgerungen beider Fragestellungen sind in Kapitel 9 dokumentiert.

3.3. Definition zentraler Begriffe

Zuvor wurden die Fragestellungen der Dissertation abgeleitet. Damit im weiteren Verlauf der Arbeit ein einheitliches Verständnis über den Inhalt herrscht, werden an dieser Stelle kurze Definitionen einiger zentraler Begrifflichkeiten gegeben.

3.3.1. Fahrleistung. Als zentrales Element des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) wurde die Fahrleistung in allen Studien der vorliegenden Dissertation untersucht. Der Begriff der Fahrleistung bezieht sich dabei auf eine Trajektorie (bezüglich der Längs- und/oder Querrichtung). Diese wird entweder durch einen Fahrer bzw. eine Fahrerin (nicht-automatisiertes Fahren) oder durch ein automatisiertes System (automatisiertes Fahren) erbracht.

3.3.2. Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Im Kontext der subjektiven Fahrleistungsbewertung beschäftigten sich verschiedene Studien (Studien 3-6) der Dissertation mit den Schwellenwerten einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Dieser Begriff der Schwellenwerte wird in der Dissertation komplementär zum Begriff der Fahrleistungsschwelle verwendet. Im Hinblick auf das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) stellen diese Schwellenwerte die untere Grenze der im Modell postulierten Zielwerte in der Fahrleistung dar. Werden die Schwellenwerte überschritten, wird der Zielwert in der Fahrleistung nicht erreicht. Liegt die Fahrleistung unterhalb des Schwellenwerts, wird der Zielwert in der Fahrleistung wiederum erreicht.

3.3.3. Funktionale Verhaltensanpassungen. Zentraler Untersuchungsgegenstand der Studien 1, 5 und 6 waren die funktionalen Verhaltensanpassungen. Diese werden im Rahmen der Arbeit gemäß Kapitel 2.4.1.4 als Mechanismus des regulativen Fahrerverhaltens zur Unfallvermeidung verstanden. Gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sind sie die kompensativen Handlungen auf den drei Modellpfaden (Pfad 1: Anpassungen der Situation; Pfad 2: Anpassung der

Nutzerfaktoren; Pfad 3: Anpassung der Zielwerte). In den Studien 5 und 6 wurde unter der untersuchten Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung die Auslösung dieser funktionalen Verhaltensanpassungen verstanden.

4. Studie 1 – Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0614/2014 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0614/2014.

The author is solely responsible for the content.

4.1. Zielsetzung und Hypothesen

Das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) nimmt an, dass Fahrerinnen und Fahrer in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung und -antizipation ihre funktionalen Verhaltensanpassungen aktivieren. Aufbauend hierauf diente die Studie 1 der vorliegenden Dissertation der Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen ausgelöst durch eine sich verändernde Fahrsituation (s. Kapitel 3.2.1 und Abbildung 8, grüne Hervorhebung). Da bereits diverse Arbeiten empirische Nachweise in diesem Kontext liefern konnten (z. B. Schwalm et al., 2008, s. Kapitel 2.4.2), zielte die Studie auf eine konfirmatorische Überprüfung der bisherigen Befunde ab. Es wurde die Fragestellung untersucht, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer tatsächlich den Situationsverlauf in einer dynamischen, d. h. sich verändernden, Fahrsituation antizipieren und ihr Verhalten hierauf anpassen. Vor dem Hintergrund der Entwicklungen des automatisierten Fahrens (s. Kapitel 2.6), die es Fahrerinnen und Fahrer ab SAE Level 3 erlauben, sich bei aktiver Automatisierung von der Fahraufgabe abzuwenden, wurde die sich verändernde Fahrsituation durch eine Übernahmesituation, d. h. einem Wechsel vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren, operationalisiert. Als solches wurde das Ziel der konfirmatorischen Überprüfung der funktionalen Verhaltensanpassungen mit dem weiteren Ziel der Dissertation, der Untersuchung der Verfügbarkeit der funktionalen Verhaltensanpassungen im Kontext des automatisierten Fahrens (erstes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.1), ermöglicht. Die empirische Untersuchung der Fragestellung wurde von der Autorin der vorliegenden Dissertation

im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2017) und war unter Anleitung der Autorin Gegenstand der unveröffentlichten studentischen Arbeit von Heckler (2016).

Zur Konkretisierung der Fragestellung erlaubt es die in Kapitel 2 diskutierte Literatur, Hypothesen über die Verfügbarkeit bzw. die Gestaltung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer Übernahmesituation des automatisierten Fahrens zu generieren. Hierzu werden insbesondere die in Kapitel 2.6.3 berichteten Annahmen von Voß und Schwalm (2015) zur Rolle des automatisierten Fahrens für das Fahrerverhalten herangezogen (s. auch Abbildung 7).

Durch die Ausführung der Fahraufgabe (und ab SAE Level 3 auch der Überwachung der Fahrumgebung) durch das automatisierte System (s. Kapitel 2.6, SAE International, 2018), sinken die Belastung und in Folge auch die Beanspruchung von Fahrerinnen und Fahrern ab. Menschen scheinen grundsätzlich allerdings bestrebt zu sein, ein mittleres Arousallevel beizubehalten (Bourne & Ekstrand, 2001), da sie dort am leistungsfähigsten sind. Zur Vermeidung einer zu geringen Beanspruchung beginnen Fahrerinnen und Fahrer folglich sich im automatisierten Fahren mit zusätzlichen FFT zu beschäftigen. Im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen scheinen Fahrerinnen und Fahrer die Ziele und Aktivität in der FFT über die Pfade 1 und 3 des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) zu erhöhen. Diese Idee wurde im Rahmen der aktuellen Studie unter der folgenden Hypothese H1 untersucht:

H1: Die Verwendung einer automatisierten Fahrfunktion führt innerhalb der Systemgrenzen zu einer erhöhten Bearbeitung einer FFT im Vergleich zu einer nicht-automatisierten Fahrt.

Wie in Kapitel 2.6.2 erwähnt wurde, können kritische Fahrsituationen, in denen eine automatisierte Fahrfunktion an die Systemgrenzen stößt, bis zum SAE Level 3 zu systeminitiierten Übergaben der Fahraufgabe an den Fahrer bzw. die Fahrerinnen führen (SAE International, 2018). Wie zuvor diskutiert wurde, stellt eine solche Übergabe eine sich verändernde Fahrsituation dar. An dieser Stelle ist es nun fraglich, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer auf ihre funktionalen Verhaltensanpassungen im Sinne der von Voß und Schwalm (2015) postulierten Annahmen (s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) zurückgreifen können. Durch die automatisierte Fahrt, in der Fahrerinnen und Fahrer sich von der Fahraufgabe abwenden dürfen (SAE Level 3), sind sie vermutlich nicht mehr im Loop der Fahraufgabe (Endsley & Kiris, 1995; Kaber & Endsley, 1997). Dies bedeu-

tet, dass keine bzw. nur wenige der verfügbaren kognitiven Ressourcen für die Fahraufgabe genutzt werden. Diese sind stattdessen bei den FFT allokiert (s. H1) und stellen die fahrerseitige Belastung dar. Im Falle einer Übernahme-situation würde die Belastung durch das Hinzukommen der Situationsfaktoren der Fahraufgabe zusätzlich ansteigen. Zur Vermeidung einer Überbelastung und zur Gewährleistung einer sicheren Fahrleistung ist deshalb im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) das folgende Fahrerverhalten in Nachfolge zu einer Übernahmeaufforderung zu erwarten (s. Schritt e in Abbildung 7). Als umgekehrter Prozess zu dem, was bei der Aktivierung eines automatisierten Systems passiert (H1), reduzieren Fahrerinnen und Fahrer in einer Übernahme-situation proaktiv die Ziele und die Aktivität der FFT (Pfade 1 und 3 im Arbeitsmodell) bis diese auf dem Niveau einer nicht-automatisierten Fahrt sind. Als solches werden kognitive Ressourcen frei, die für die sichere Ausführung der Fahraufgabe genutzt werden können. Eine fehlende Reduktion könnte im Umkehrschluss auf eine ausbleibende Verfügbarkeit der funktionalen Verhaltensanpassungen hindeuten und somit als Sicherheitsrisiko verstanden werden. Dies würde in den in Kapitel 2.6.3 gemachten Annahmen zum Fahrerverhalten im automatisierten Fahren dem Fall einer Überbelastung (s. Schritt d in Abbildung 7) entsprechen. Eine weitere Hypothese H2 fasst diesen Prozess zusammen:

H2: In Vorbereitung auf eine Übernahme-situation von automatisiertem zu nicht-automatisiertem Fahren reduzieren Fahrerinnen und Fahrer nach einem TOR proaktiv die Bearbeitung einer FFT auf das Aktivitätslevel einer nicht-automatisierten Fahrt.

Ausgehend von der Idee, dass die funktionalen Verhaltensanpassungen einer der Mechanismen der Unfallvermeidung bzw. der Gewährleistung einer sicheren Fahrleistung sind (Schwalm et al., 2015; Voß & Schwalm, 2015), ist anzunehmen, dass die Fahrleistung in einer Übernahme-situation (d. h. die Qualität der Übernahme) von der Aktivierung dieses Regulationsprozesses (s. H2) abhängt. H3 skizziert diesen angenommenen Zusammenhang:

H3: Es gibt einen Zusammenhang zwischen der proaktiven FFT-Reduktion und der Übernahmequalität. Je stärker die FFT-Reduktion, desto besser ist die Übernahmequalität.

Wie in Kapitel 2.6.3 diskutiert wurde, scheint das fahrerseitige Übernahmeverhalten stark von der Gestaltung – und insbesondere von der Salienz – des TOR abzuhängen (Gold et al., 2013; Naujoks et al., 2014). Folglich erscheint es naheliegend, dass

auch die Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen im Kontext des automatisierten Fahrens mit der TOR-Gestaltung zusammenhängt. Es ist anzunehmen, dass das Design des TOR sowohl Auswirkungen auf die proaktive FFT-Reduktion als auch auf die angeschlossene Übernahmequalität hat. Diese Idee wurde in der Studie in der Hypothese H4 untersucht:

H4: Je höher die Salienz des TOR, desto stärker ist die proaktive FFT-Reduktion und desto besser ist die Übernahmequalität.

Diese vier Hypothesen wurden im Rahmen der Studie 1 in einer Fahrstudie, in der die Versuchspersonen neben der Fahraufgabe eine zusätzliche FFT bearbeiteten, empirisch überprüft. In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Methode gefolgt von den Ergebnissen des Versuchs berichtet. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion, die die Beantwortung der Hypothesen sowie eine inhaltliche und methodische Erörterung der Ergebnisse beinhaltet.

4.2. Methode

Zur Untersuchung der Fragestellung (Gestaltung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation) sowie der vier vorgestellten Hypothesen wurde eine statische Fahrstudie im Kontext des automatisierten Fahrens durchgeführt. In dieser absolvierten die Versuchspersonen diverse Versuchsfahrten mit bzw. ohne eine automatisierte Fahrfunktion. Weiterhin bearbeiteten die Teilnehmenden eine FFT. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt wurde, wurde die sich verändernde Fahrsituation über Übernahmesituationen vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren abgebildet. Im Folgenden sind das Material, das Design und der Ablauf sowie die Stichprobe der Studie beschrieben.

4.2.1. Material.

4.2.1.1. Fahr Simulator. Die Studie fand im statischen Fahr Simulator des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University statt (DaimlerChrysler Aerospace, Krauss-Maffei Wegmann GmbH & Co. KG). Das verwendete Mock-up war der vordere Teil eines BMW 5 (BMW 550i, 2012) mit einer Premiaausstattung und Automatikgetriebe. Mit vier Projektoren (Epson EB-1920W) und einer gekrümmten Leinwand wurde eine Panoramaansicht mit einem Sichtbereich von bis zu 210° horizon-

tal und 40° vertikal erreicht. Die Simulation der Rückansicht wurde für die zwei Seitenspiegel über zwei zusätzliche Projektoren und für den Rückspiegel mit einem 22" LED Monitor (Samsung S22C450BW) realisiert. Als Simulationssoftware (Routengenerierung und Datensammlung) wurde Silab 5.0 (WIVW GmbH, Veitshöchheim, Deutschland) verwendet. Die hard- und softwareseitigen Vorbereitungen der Studie sowie die technische Versuchsbegleitung fanden durch das Fahrsimulationsteam des Fachbereichs „Automatisiertes Fahren“ des ika statt.

4.2.1.2. Automatisierte Fahrfunktion. Im Rahmen des Versuchs wurde eine automatisierte Fahrfunktion, ein Staupilot, verwendet. Fahrten mit aktiver Fahrfunktion werden im Folgenden als automatisiertes Fahren (AF) bezeichnet. Komplementär werden Fahrten ohne aktive Fahrfunktion als nicht-automatisiertes Fahren (NF) definiert. Bei der automatisierten Fahrfunktion handelte es sich nach SAE J3016 um ein SAE Level 3 System (SAE International, 2018), da Längs- und Querführung vom System übernommen wurden. Gleichermaßen fand die Umgebungsüberwachung durch das System statt, sodass Fahrerinnen und Fahrer bei aktiver Automation den Loop der Fahraufgabe verlassen durften und nur nach einem TOR übernahmebereit sein mussten. Allerdings mussten die Versuchspersonen auch im AF immer mindestens eine Hand am Lenkrad halten. Diese Forderung basierte auf der theoretischen Überlegung, dass andernfalls mögliche Verhaltenseffekte auf die Motorik bzw. Handhaltung der Versuchspersonen und nicht auf die kognitiven Aspekte des AF zurückzuführen wären.

Wie bereits erwähnt, handelte es sich bei der automatisierten Fahrfunktion um einen Staupiloten. Dieser ließ sich ausschließlich aktivieren, sofern die Fahrgeschwindigkeit ≤ 60 km/h und die TTC zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug kleiner als vier Sekunden war. Die Verfügbarkeit des Systems wurde über ein weißes Symbol im Instrumenten-Kombi angezeigt (s. Abbildung 9).

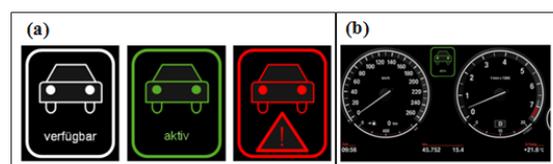


Abbildung 9. (a) Anzeigen der Systemzustände der automatisierten Fahrfunktion der Studie 1. Links = verfügbar; Mitte = aktiv; rechts = Übernahme. (b) Positionierung der Anzeigen im Instrumenten-Kombi.

Die Aktivierung des Systems erfolgte über einen Knopfdruck auf dem Lenkrad. Nach Aktivierung wechselte die Systemanzeige auf aktiv (s. Abbildung 9) und das System erfüllte, wie erwähnt, die Fahraufgabe im Rahmen eines SAE Level 3 Systems. In diesem Systemzustand zentrierte sich das Ego-Fahrzeug auf dem aktuellen Fahrstreifen und hielt eine TTC von 1.5 s plus 2.5 m Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug ein.

Im Falle einer systeminitiierten Deaktivierung mit resultierender Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer bzw. die Fahrerin gab das System eine Sekunde vor der Übergabe ein Signal (d. h. einen TOR). Es gab drei Varianten dieses TOR-Signals, die alle das Aufleuchten eines roten Übernahmesymbols im Instrumenten-Kombi (s. Abbildung 9) beinhalteten. In Abhängigkeit der Signal-Variante gab es darüber hinaus einen akustischen Warnton: keinen Ton (Gruppe Signal *no*), einen wenig salienten Ton (Gruppe Signal *low*) oder einen hoch salienten Ton (Gruppe Signal *high*). Tabelle 5 bietet einen Überblick über die verschiedenen akustischen Warnsignale. Die Auswahl und Gestaltung der Warnsignale beruhte zum einen auf Literatur (Genuit & Sottek, 2010), die besagt, dass sowohl die Tondauer als auch der Schalldruckpegel Einfluss auf die Tonwahrnehmung haben. Zum anderen wurde in einer vorgelagerten Expertenbewertung verschiedene Signalvarianten dargeboten und bewertet.

Tabelle 5

Varianten des akustischen Warnsignals beim TOR-Signal des Staupiloten der Studie 1

Gruppe	Warnsignal	Lautstärke in dB(A) (Signal + Umgebung)
Signal <i>no</i>	/	57.3 ± 0.6
Signal <i>low</i>	Einfacher Ton (750 Hz; -21 dBFS)	61.4 ± 0.4
Signal <i>high</i>	Dreifacher Ton (750 Hz; 0 dBFS; 0.2 s Intervall)	67.3 ± 1.0

Anmerkung. Die Messungen der Lautstärke fanden mit einem Schallpegelmessgerät (Precision Sound Level Meter Type 2232; Briel, Briel & Kjaer) statt. Für jede Gruppe wurde ein gemittelter Wert über fünf Messungen ermittelt.

4.2.1.3. Fahrscenarien. Im Verlauf der Studie wurden verschiedene Versuchsfahrten auf einer Autobahn durchgeführt. Die in diesen Fahrten dargestellten Fahrscenarien basierten auf Vorarbeiten des ika (s. Josten, Zlocki & Eckstein, 2016). Jede Versuchsfahrt dauerte 5.5 min und beinhaltete mitfließenden Verkehr. Start und Ende jeder Fahrt waren jeweils ein Autobahnrastplatz. Zwischen den verschiedenen Versuchsfahrten blieben das Streckendesign und die Verkehrsdichte identisch, einzig die Vegetation und die Bebauung am Straßenrand variierten. In jeder der Versuchsfahrten war die Au-

tobahn durch eine Leitplanke begrenzt. Es gab zwei Fahr- sowie einen Standstreifen. Die Straße war leicht kurvig, wobei alle Kurven (bis auf eine, s. u.) einen Radius von mindestens 1300 m hatten.

Der erste Streckenabschnitt jeder Versuchsfahrt dauerte ca. 1.5 min und umfasste keinen mitfließenden Verkehr. Verkehrszeichen limitierten die Geschwindigkeit auf 130 km/h. Ein weiteres Geschwindigkeitsbegrenzungsschild (100 km/h) stellte das Ende dieses Streckenabschnitts dar. Es folgte der zweite ca. drei-minütige Streckenabschnitt. Dieser bestand aus einer Staufahrt, in der die Geschwindigkeit des nun vorhandenen Umgebungsverkehrs zwischen 15 und 50 km/h variierte. Dieser Streckenabschnitt wurde entweder im NF oder AF absolviert. Je nach Versuchsfahrt (NF, AF) stand dementsprechend der Staupilot (nicht) zur Verfügung. Das Ende dieses Streckenabschnitts wurde durch eine 200 m lange Gerade definiert, auf der sämtliche Staufahrzeuge eine konstante Geschwindigkeit von 50 km/h fuhren. Die Gerade mündete in eine Rechtskurve mit einem Radius von 300 m ($TLC = 2.26 \pm 0.1$ s). Diese Kurve wurde als kritische Fahrsituation definiert, da Fahrerinnen und Fahrer bei einer Fahrt auf dem rechten Fahrstreifen ohne einen Lenkeingriff schnell auf den benachbarten, linken Fahrstreifen abdriften würden. Im AF kam es an dieser Stelle zu einer systeminitiierten Deaktivierung des Staupiloten. Eine Sekunde vor Übernahme wurde das Signal, d. h. der TOR, gegeben. Um die Vergleichbarkeit zwischen NF und AF zu gewährleisten, wurde im NF an gleicher Stelle wie im AF (d. h. in der kritischen Fahrsituation) das Signal im Sinne einer Warnung gegeben. Der dritte Streckenabschnitt begann am Ende dieser Kurve. Der Stau löste sich auf und die Versuchspersonen absolvierten eine weitere Minute eine freie Fahrt bei maximal 130 km/h. In dieser Phase gab es weiterhin mitfließenden Verkehr. Anschließend endete die Fahrt auf einem Parkplatz. Abbildung 10 beinhaltet eine schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs einer solchen Versuchsfahrt.

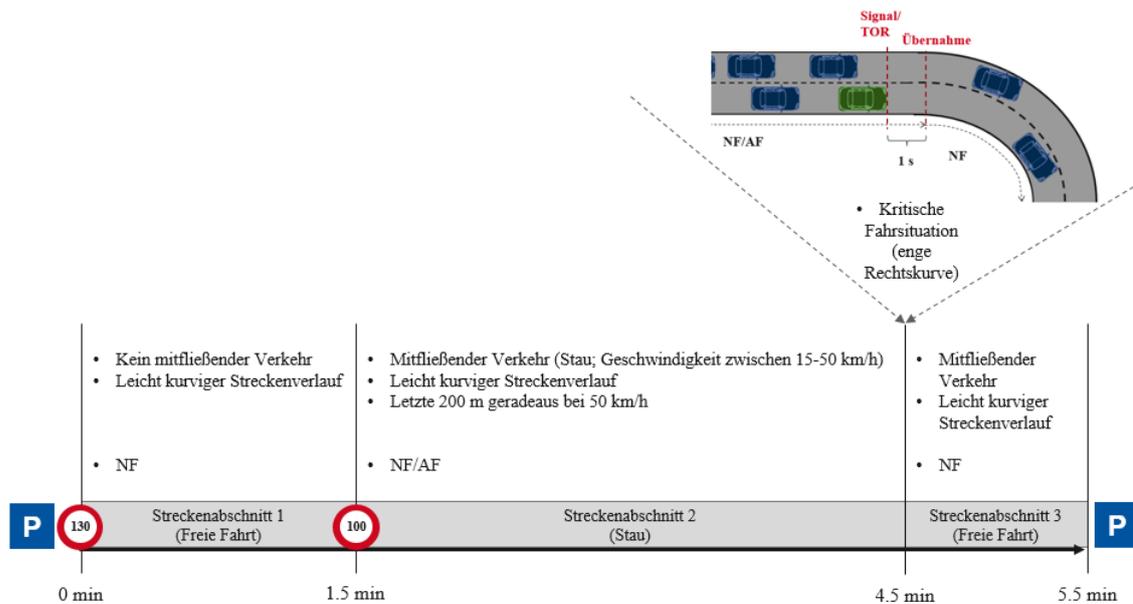


Abbildung 10. Schematische Darstellung einer Versuchsfahrt inkl. der kritischen Rechtskurve der Studie 1 (nach Josten et al., 2016). Anmerkung. Das Ego-Fahrzeug ist in grün dargestellt. NF = nicht-automatisiertes Fahren; AF = automatisiertes Fahren.

4.2.1.4. Fahrfremde Tätigkeit (FFT) – Surrogate Reference Task. Zur Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen im Mehrfachaufgabenkontext gemäß den in Kapitel 4.1 aufgestellten Hypothesen bearbeiteten die Versuchspersonen zusätzlich eine FFT. Dabei wurde darauf geachtet, eine FFT auszuwählen, die zu modalitätsbasierten Interferenzen mit der Fahraufgabe führt und somit die Aktivierung funktionaler Verhaltensanpassungen überhaupt erforderlich macht (s. auch Kapitel 2.2.2 und 2.4.1.2). Es wurde die Surrogate Reference Task (SuRT) (Mattes & Hallén, 2009) als FFT genutzt. Die SuRT ist eine visuell-manuelle Suchaufgabe, in der es die Aufgabe der Versuchspersonen ist, einen größeren Kreis (Zielreiz) unter 50 weiteren, leicht kleineren Kreisen (Distraktoren) zu identifizieren. Hierzu muss ein grauer Balken auf die Position des Zielreizes bewegt werden (s. Abbildung 11). Das Größenverhältnis von Zielreiz zu Distraktoren war im aktuellen Versuch 150:110. Da die Aufgabe unterbrechbar war, konnten die Teilnehmenden die Bearbeitungsgeschwindigkeit und -frequenz selbstständig bestimmen.



Abbildung 11. Aufbau und Anzeige der SuRT in Studie 1

Die SuRT lief über ein Dell M6400 Notebook (Intel Core 2 Duo T8300 2×2.4 GHz), welches im Fußraum des Beifahrersitzes positioniert war. Die Darstellung der Aufgabe fand auf einem 10.1" Bildschirm (TFT-1026, Lenco; Auflösung 1440×900 px) statt, der auf der Höhe des fahrzeugeigenen Infotainment-Systems montiert war. Zur Aufgabensteuerung wurde ein externes Nummernpad (Keypad ID0120, LogiLink) verwendet. Dieses lag auf der Mittelkonsole und konnte von den Versuchspersonen gemäß dem eigenen Komfortempfinden frei bewegt und in eine angenehme Bedienposition gebracht werden (s. Abbildung 11). Über die Pfeiltasten links und rechts des Nummernpads konnte der graue Balken auf dem Bildschirm in Richtung des Zielreizes bewegt werden. Die Position des Zielreizes konnte mit der Pfeil-nach-oben-Taste bestätigt werden. Nach Abschluss eines Trials wurde im direkten Anschluss eine neue Anordnung von Zielreiz und Distraktoren angezeigt. Die Eingaben auf den Pfeiltasten sowie der Beginn eines neuen Trials werden im Logfile der SuRT ereignisbasiert aufgezeichnet. D. h., jede Eingabe wird zeitsynchron zum Auftreten inklusive des Zeitstempels auf Millisekundenbasis protokolliert.

4.2.1.5. Fragebögen. Für jede Versuchsfahrt wurden zwei Fragen zur Erfassung der Subjektiveindrücke der Teilnehmenden verwendet. Bei AF erfasste eine erste Frage die Übernahmeleistung der Versuchspersonen bezogen auf die Geschwindigkeit, mit der sie ihrer Meinung nach die Fahraufgabe übernommen hatten. Hierfür standen vier Antwortkategorien („sehr langsam (1)“, „langsam (2)“, „schnell (3)“ oder „sehr schnell (4)“) zur Verfügung. Als zweite Frage wurde sowohl bei AF als auch bei NF erfragt, inwiefern die Versuchspersonen das akustische Signal (d. h. im AF den akustischen TOR) wahrgenommen hatten. Beide Fragen wurden über einen paper-pencil-Fragebogen abgefragt.

4.2.2. Design. Es wurden zwei UV im Rahmen der Studie definiert. Zum einen gab es den Innersubjekt-Faktor Fahrttyp (NF, AF). Jede Versuchsperson absolvierte pro Fahrttyp drei Versuchsfahrten, d. h. insgesamt sechs Versuchsfahrten. Die SuRT wurde während jeder dieser Fahrten bearbeitet. Jeweils eine NF und AF wurden zu einem Block zusammengefasst, wobei die Reihenfolge des Fahrttyps zwischen den Teilnehmenden und Blöcken balanciert wurde. Zum anderen gab es den Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*). Jede Versuchsperson wurde zufällig einer Signal-Gruppe zugeordnet. Folglich handelte es sich bei der Studie insgesamt um ein 2×3 faktorielles Design. Abbildung 12 beinhaltet eine schematische Darstellung des faktoriellen Studiendesigns.

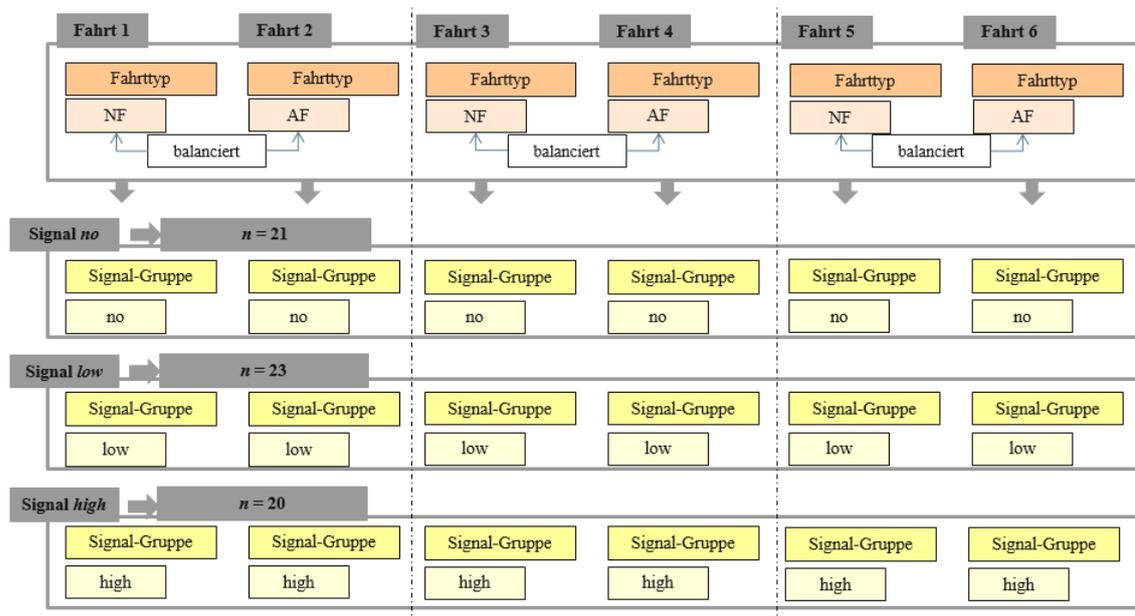


Abbildung 12. Schematische Darstellung des Studiendesigns der Studie 1

Die AV der Studie waren die M Dev als Maß der Fahrleistung, die SuRT-Inputs – d. h. die Anzahl der Tastendrucke (inkl. der Pfeiltasten rechts und links zur Bewegung des grauen Balkens und der Pfeil-nach-oben-Taste für die Bestätigung des Zielreizes) – als Maß der FFT-Bearbeitung sowie die Beantwortungen der Subjektfragen. Für die ersten beiden Maße (Objektivmaße: M Dev und SuRT-Inputs) wurde in einer vorgelagerten Analyse überprüft, inwiefern diese Parameter für die Studienzwecke geeignet sind. Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 4.3.1 berichtet.

4.2.3. Ablauf. Die Studie wurde zwischen dem 31. August und dem 15. September 2015 durchgeführt. Pro Versuchsperson nahm die Durchführung ca. 1.5 h in Anspruch. Nach einer kurzen Begrüßung und der Unterzeichnung der Datenschutzerklärung führte die Versuchsleitung mit der Versuchsperson einen Sehtest gemäß DIN 58220 durch. Nach erfolgreicher Überprüfung einer ausreichenden Sehstärke fand die demografische Vorbefragung statt. Im Anschluss betreten die Versuchsleitung und die Versuchsperson den Simulator. Die Versuchsleitung informierte die Versuchsperson über die Studienzwecke, nämlich die Untersuchung des Fahrerverhaltens im automatisierten Fahren, den Ablauf sowie die Versuchsdauer. Die Versuchsperson stellte ihren Sitz sowie die Spiegel ein und legte den Sicherheitsgurt an. Es folgte eine Erklärung zur SuRT und die Versuchsperson hatte für 30 s die Möglichkeit, die FFT zu üben. Anschließend gab die Versuchsleitung die relevanten Informationen und Instruktionen zum Fahrzeug und zur Fahraufgabe. Die Versuchsperson wurde gebeten, immer den rechten Fahrstreifen zu nutzen, sich an die StVO zu halten und nach Möglichkeit eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h zu fahren. Zu Gewöhnungszwecken konnte die Versuchsperson sich in einer 2.5-minütigen Übungsfahrt mit dem Fahrzeug vertraut machen.

Es folgte der Experimenterteil der Studie. Die Versuchsleitung instruierte vor der ersten Versuchsfahrt, dass bei allen folgenden Fahrten die SuRT bearbeitet werden müsste. Dabei sollte die SuRT ab dem Auffahren auf die Autobahn bis zum Ende der Fahrt bearbeitet werden. Die Versuchsperson wurde gebeten, beide Aufgaben (Fahraufgabe und SuRT) bestmöglich zu absolvieren – keine der beiden Aufgaben wurde in der Instruktion priorisiert. Des Weiteren wurde die Versuchsperson gebeten, immer eine Hand am Lenkrad zu haben und bei Erscheinen eines Staus, sich diesem anzunähern sowie eine konstante Geschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug zu halten. Die Versuchsperson erhielt die Cover-Story, dass in einigen der Fahrten ein Staupilot verfügbar wäre. Bei der Verwendung des Piloten könnte es entweder bei Auflösung des Staus oder bei einer unvorhersehbaren Situation zu einer Abschaltung des Systems (systeminitiierte Deaktivierung) kommen. Es wurde der Staupilot erklärt und das TOR-Signal gemäß der Signal-Gruppe demonstriert. Die Versuchsperson wurde darauf aufmerksam gemacht, dass das Signal nicht nur bei einer systeminitiierten Deaktivierung im AF, sondern auch im NF bei der Auflösung eines Staus bzw. bei einer unvorhersehbaren Situation im Sinne eines Warnsignals gegeben würde. Anschließend wurden die Fahrt durchgeführt und die Subjektivfragen gestellt. Daraufhin folgte die nächste Fahrt

gemäß dem Randomisierungsplan. Nach Abschluss der letzten Experimentalfahrt bedankte sich die Versuchsleitung bei der Versuchsperson für die Teilnahme und verabschiedete sie.

4.2.4. Stichprobe. Die Versuchspersonenrekrutierung fand über persönlichen Kontakt, E-Mail sowie soziale Netzwerke statt. Als Einschlusskriterien wurden eine gültige Fahrerlaubnis sowie eine ausreichende Sehstärke (normalsichtig oder korrigiert) definiert. $N = 67$ Versuchspersonen erfüllten diese Kriterien und nahmen an der Studie teil. Technische bzw. gesundheitliche Probleme führten zum Ausschluss von drei Versuchspersonen, sodass die finale Stichprobe aus $N = 64$ Teilnehmenden ($n = 22$ weiblich) bestand. Die Altersspanne war zwischen 18 und 62 Jahren ($M = 29$, $SD = 9$). Die durchschnittliche Fahrerfahrung lag bei $M = 10$ Jahren ($SD = 8$). 59 % der Stichprobe gaben an, bereits Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen zu haben. Die $N = 64$ Versuchspersonen verteilten sich wie folgt auf den Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe: Signal *no*: $n = 21$; Signal *low*: $n = 23$; Signal *high*: $n = 20$. Die Versuchspersonen erhielten keine Incentivierung.

4.3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Simulatorversuchs im Sinne der aufgestellten Hypothesen berichtet. Als vorgelagerter Schritt wird zunächst die Aufbereitung der Objektivdaten beschrieben und die Eignung der zwei gewählten AV zur Beantwortung der Hypothesen überprüft. Anschließend werden die Analyseergebnisse in der Reihenfolge der zu beantwortenden Hypothesen dargestellt. Zunächst wird auf die FFT eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse zur Fahraufgabe und zum Zusammenhang zwischen FFT-Bearbeitung und Fahrleistung berichtet. Abschließend werden die Subjektivbewertungen als Unterstützung der Objektivmaße angeführt.

4.3.1. Datenaufbereitung und -überprüfung. Zur Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen, denen die Idee eines zeitlichen, proaktiven Handlungsmechanismus zugrunde liegt, fand eine Analyse der Objektivdaten über den Zeitverlauf statt. Die Simulationssoftware gab pro Versuchsfahrt gemittelte Fahrdaten zeitlicher Intervalle t_i mit einer Länge von 250 ms aus. D. h., jedes Intervall t_i umfasste Fahrdaten von 250 ms. Als Referenzpunkt t_0 wurde die kritische Fahrsituation/die Übergabe der

Fahraufgabe im AF gewählt. Dementsprechend bezeichnete das Intervall t_{+1} die Zeit zwischen 0 und 250 ms nach der Übergabe; t_{+2} die Zeit zwischen 250 und 500 ms etc. Die analoge Bezeichnung wurde für die Zeit vor der kritischen Fahrsituation/der Übergabe gewählt. t_{-1} bezeichnete die Zeit zwischen -250 ms und 0 s vor der Übergabe etc. Die SuRT-Aktivität wurde, wie in Kapitel 4.2.1.4 erläutert, während jeder Versuchsfahrt kontinuierlich und ereignisbasiert aufgezeichnet. D. h., für jede Eingabe auf den Pfeiltasten (SuRT-Inputs) wurde im Datenlogfile ein separater Eintrag mit einem genauen Zeitstempel auf Millisekundenbasis generiert. Für jedes Intervall t_i wurden deshalb die Anzahl der SuRT-Inputs addiert. Dieses Maß gab dementsprechend an, wie viele SuRT-Inputs die Versuchsperson pro Intervall machte.

Jede Versuchsperson absolvierte drei Versuchsfahrten pro Fahrttyp (NF, AF). Für einige Analysen war es notwendig, dass die Daten dieser drei Fahrten pro Fahrttyp aggregiert (d. h. gemittelt) wurden. Als solches ergab sich pro Versuchsperson, Fahrttyp und AV ein aggregierter Wert für jedes Intervall t_i . In den folgenden Analysen wird jeweils angegeben, inwiefern auf diese aggregierten Werte oder die nicht-aggregierten Daten zurückgegriffen wurde.

Zur Überprüfung der Eignung der zwei ausgewählten objektiven AV (M Dev und SuRT-Inputs) wurden diverse Vorauswertungen durchgeführt. Zuerst wurde die M Dev mit zwei weiteren, möglichen Fahrleistungsmaßen (TLC und Gierwinkelfehler) verglichen. Zu diesem Zweck wurden Korrelationsanalysen mit den nicht-aggregierten Daten durchgeführt. Es wurde pro Signal-Gruppe und Fahrttyp überprüft, inwiefern ein Zusammenhang zwischen den Maßen nach der kritischen Fahrsituation/der Übernahme ($t_{+1} - t_{+5}$) bestand. Die Ergebnisse lieferten ausreichend hohe und signifikante Effekte. Hinsichtlich der TLC wurden alle Analysen signifikant (alle $r \geq .338$; alle $p \leq .01$). Bezüglich des Gierwinkelfehlers wurden vier von sechs Korrelationen signifikant ($r \geq .368$; $p \leq .01$). Ausgehend von diesen Ergebnissen ist anzunehmen, dass alle drei Maße ähnliche Ergebnisse in den nachfolgenden Untersuchungen liefern würden und deshalb die M Dev als repräsentatives Maß ausgewählt werden kann. Neben der M Dev wurde außerdem überprüft, inwiefern die Versuchspersonen die SuRT mit ausreichender Qualität bearbeiteten. Hierzu wurde die mittlere Anzahl der Bestätigungen (Eingaben auf der Pfeil-nach-oben Taste) und die Qualität der Bearbeitung analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Versuchspersonen die Aufgabe in jeder Signal-Gruppe und beiden Fahrttypen mit ausreichender Qualität bearbeiteten (> 90 Bestätigungen pro Ver-

suchsfahrt und > 95 % korrekte Bestätigungen). Dieses Ergebnis bedeutet, dass die SuRT-Inputs als AV valide sind und in den weiteren Schritten als Maß genutzt werden können.

Zum Ausschluss möglicher konfundierender Effekte zwischen den Signal-Gruppen aufgrund einer mangelhaften bzw. fehlerhaften Wahrnehmung des Signals wurde abschließend die Wahrnehmung desselben analysiert. In der Gruppe Signal *low* lag die Wahrnehmung des Tons bei 97 % während in der Gruppe Signal *high* der Ton immer wahrgenommen wurde. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse nicht durch die Signal-Wahrnehmung beeinflusst wurden.

4.3.2. Effekte des AF auf die SuRT-Aktivität im Normalverkehr. Eine erste Analyse betraf die Untersuchung der Effekte des AF auf die SuRT-Aktivität im Normalverkehr, d. h. bei aktiver automatisierter Fahrfunktion innerhalb der Systemgrenzen. Zu diesem Zweck wurden die aggregierten Daten herangezogen und eine fünfzehnkündige Periode innerhalb der Staufahrt vor der kritischen Fahrsituation ($t_{-80} - t_{-20}$) betrachtet. Diese Sequenz der Staufahrt hatte einen ausreichenden zeitlichen Abstand (fünf Sekunden) zur kritischen Fahrsituation und kann deshalb als Normalverkehr bezeichnet werden.

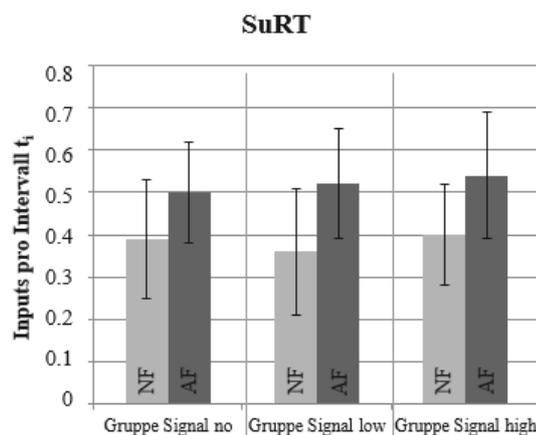


Abbildung 13. Mittelwerte der FFT-Aktivität (SuRT-Inputs) während der Staufahrt (Normalverkehr) der Studie 1.

Anmerkung. Ein Intervall t_i hatte eine Dauer von 250 ms.

Es wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit dem Innersubjekt-Faktor Fahrtyp (NF, AF) und dem Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*) als UV durchgeführt. Als AV dienten die SuRT-Inputs (s. Abbildung 13). Die Ergebnisse zeigten ausschließlich für den Faktor Fahrtyp einen signifikanten Haupteffekt ($F(1, 61) = 124.46, p \leq .001, \eta_p^2 = .67$). Im AF wurden im Vergleich zum NF signifikant mehr SuRT-Inputs gemacht. Die Interaktion Fahrtyp*Signal-Gruppe war nicht signifikant. Im Sinne der Datenüberprüfung (s. auch vorheriges Kapitel) kann dies als Indiz dafür verstanden werden, dass mögliche Effekte zwischen den Signal-Gruppen in den weiteren Analysen nicht auf unterschiedliche Fähigkeiten in der SuRT-Bearbeitung zurückzuführen sind.

4.3.3. Reduzierung der SuRT-Aktivität nach dem TOR- bzw. Warnsignal.

Zur Untersuchung der SuRT-Aktivität nach dem TOR- bzw. Warnsignal wurden die aggregierten Daten der Intervalle t_{-5} bis t_{-1} , d. h. das letzte Intervall vor dem Signal sowie die vier Intervalle zwischen dem Signal und der kritischen Fahrsituation bzw. der Übernahme-situation, untersucht (s. Abbildung 14).

Zur inferenzstatistischen Untersuchung der Daten wurde zunächst für beide Fahrtypen (NF, AF) jeweils eine ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjekt-Faktor Zeitpunkt (t_{-5} bis t_{-1}) und dem Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*) durchgeführt. Als AV dienten die SuRT-Inputs. Diese zwei Analysen dienten der Untersuchung möglicher zeitlicher Effekte in der FFT-Bearbeitung sowie des Einflusses der Signal-Salienz. Für NF wurden keine signifikanten Effekte gefunden. D. h., es gab keine Veränderungen der SuRT-Aktivität in diesem Fahrtyp in Abhängigkeit der untersuchten Faktoren. Für AF zeigten sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Zeitpunkt ($F(4, 244) = 21.04, p \leq .001, \eta_p^2 = .26$) sowie eine signifikante Interaktion Zeitpunkt*Signal-Gruppe ($F(8, 244) = 3.68, p \leq .001, \eta_p^2 = .11$). D. h., die SuRT-Aktivität änderte sich im Zeitverlauf in Abhängigkeit der Signal-Gruppe.

Zur weiteren Überprüfung der SuRT-Bearbeitung wurde anschließend eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*) und Fahrtyp (NF, AF) pro Zeitpunkt (t_{-5} bis t_{-1}) gerechnet. Die SuRT-Inputs stellen erneut die AV dar. Anhand dieser Analysen sollte insbesondere die Reduktion der SuRT-Inputs im AF auf das Niveau des NF sowie mögliche Effekte der Signal-Salienz

festgestellt werden. Tabelle 6 stellt die Ergebnisse für die Haupteffekte der zwei Faktoren dar. Die Interaktion der zwei Faktoren Signal-Gruppe*Fahrtyptyp wurde für keinen der fünf Zeitpunkte signifikant.

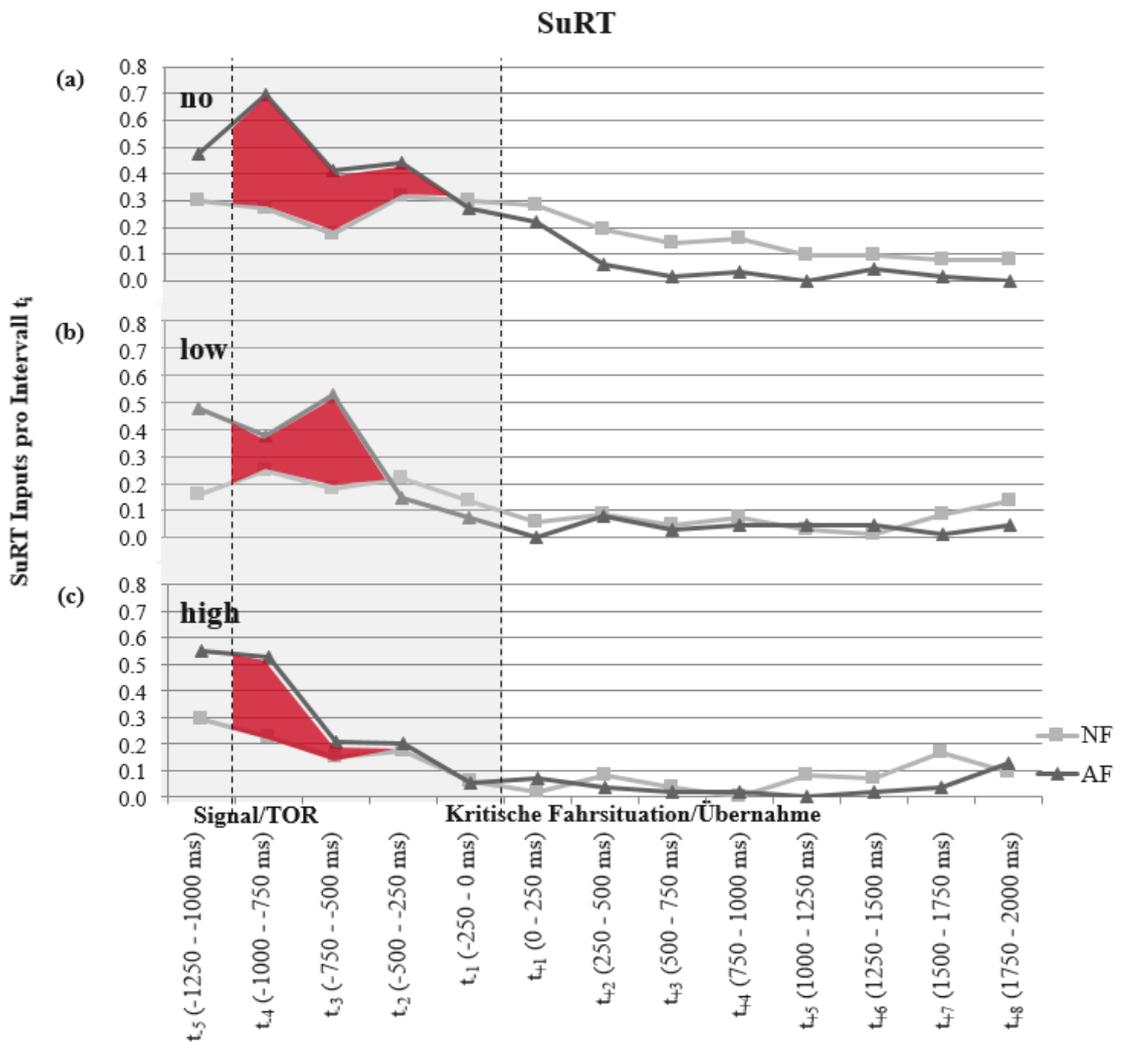


Abbildung 14. SuRT-Aktivität im Rahmen der kritischen Fahrsituation/Übernahmesituation über alle Versuchsfahrten für (a) Signal no, (b) Signal low und (c) Signal high in Studie 1. *Anmerkung.* Im Fahrtyptyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrtyptyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal. Die grau hinterlegten Intervalle wurden in den inferenzstatistischen Analysen berücksichtigt. Die rot markierten Bereiche stellen die Unterschiede zwischen NF und AF dar, d. h. das in Kapitel 4.1 diskutierte Sicherheitsrisiko einer fehlenden FFT-Reduktion mit zu erwartender Überbelastung (s. auch Schritt d in Abbildung 7). Die Reduktion im AF innerhalb der Signal no-Gruppe kann auf Lerneffekte über die verschiedenen Versuchsfahrten zurückgeführt werden (s. Text).

Zur Spezifikation dieser Ergebnisse folgten angeschlossene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) für jeden der analysierten Zeitpunkte. In diesen Vergleichen wurden die SuRT-Inputs pro Zeitpunkt und Signal-Gruppe zwischen den zwei Fahrty-

pen analysiert. Diese zusätzlichen Analysen sollten einen besseren Blick auf die hypothetisierte FFT-Reduktion im AF in Vorbereitung auf eine Übernahme ermöglichen. Dabei zielte die Analyse für den Zeitpunkt t_5 zunächst auf die Überprüfung ab, inwiefern sich die SuRT-Bearbeitung zwischen den zwei Fahrttypen (NF, AF) vor dem TOR- bzw. Warnsignal unterschied. Für Signal *low* ($p \leq .01$) und Signal *high* ($p \leq .05$) wurden signifikante Unterschiede zwischen den zwei Fahrttypen gefunden. Dies zeigt, dass in diesen zwei Gruppen im AF die SuRT-Aktivität vor dem Signal signifikant höher war. Basierend auf diesen unterschiedlich hohen FFT-Aktivitäten wurde nachfolgend untersucht, inwiefern nach dem Signal ein Angleich der SuRT-Aktivität zwischen den zwei Fahrttypen stattfand. Die Ergebnisse der hierfür berechneten paarweisen Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) sind in Tabelle 7 dokumentiert.

Tabelle 6

Haupteffekte der zweifaktoriellen ANOVA pro Zeitpunkt für die SuRT-Inputs in Studie 1

	Signal-Gruppe	Fahrttyp
t_5 (-1250 - -1000 ms)	<i>n. s.</i>	$F(1, 122) = 16.74, p \leq .001, \eta_p^2 = .12$
t_4 (-1000 - -750 ms)	<i>n. s.</i>	$F(1, 122) = 22.11, p \leq .001, \eta_p^2 = .15$
t_3 (-750 - -500 ms)	$F(2, 122) = 3.39, p \leq .05, \eta_p^2 = .05$	$F(1, 122) = 14.79, p \leq .001, \eta_p^2 = .11$
t_2 (-500 - -250 ms)	$F(2, 122) = 7.80, p \leq .01, \eta_p^2 = .11$	<i>n. s.</i>
t_1 (-200 - 0 ms)	$F(2, 122) = 11.39, p \leq .001, \eta_p^2 = .16$	<i>n. s.</i>

Anmerkung. *n. s.* = nicht signifikant. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrttyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal.

Tabelle 7

Paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) der SuRT-Aktivität zwischen den zwei Fahrttypen (NF, AF) pro Zeitpunkt und Signal-Gruppe in Studie 1

	Signal <i>no</i>	Signal <i>low</i>	Signal <i>high</i>
t_4 (-1000 - -750 ms)	$p \leq .001$	<i>n. s.</i>	$p \leq .01$
t_3 (-750 - -500 ms)	$p \leq .05$	$p \leq .001$	<i>n. s.</i>
t_2 (-500 - -250 ms)	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>
t_1 (-200 - 0 ms)	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>	<i>n. s.</i>

Anmerkung. *n. s.* = nicht signifikant. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrttyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal.

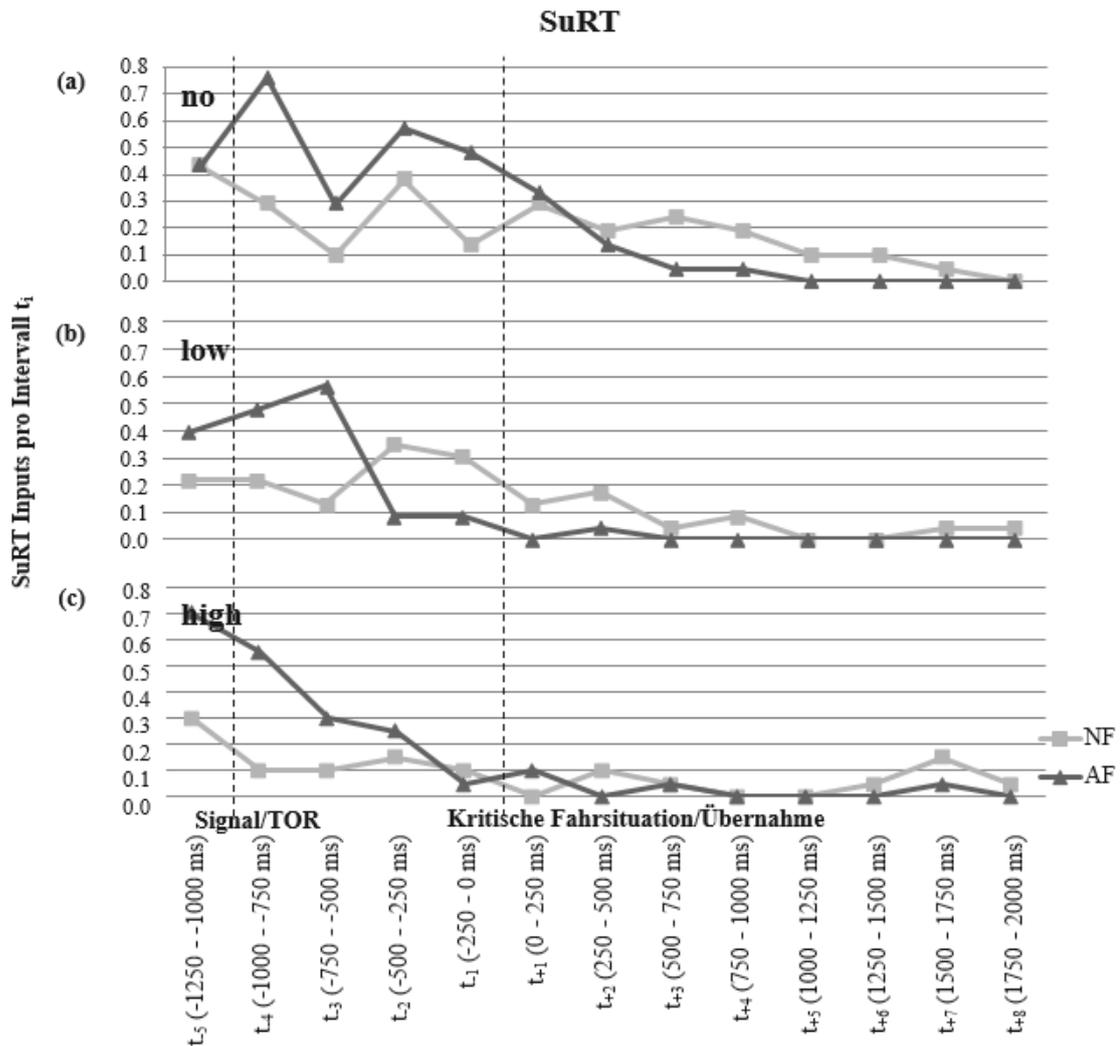


Abbildung 15. SuRT-Aktivität im Rahmen der kritischen Fahrsituation/Übernahmesituation in der ersten Versuchsfahrt für (a) Signal *no*, (b) Signal *low* und (c) Signal *high* in Studie 1. Anmerkung. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrttyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal.

Die in Tabelle 7 berichteten Effekte in der Gruppe Signal *no* waren überraschend, da ohne akustische Warnung keine Reduktion der SuRT erwartet wurde. Deshalb wurde für diese Gruppe eine zusätzliche ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjekt-Faktor Zeitpunkt (t₅ bis t₁) pro Fahrttyp (NF, AF) durchgeführt. Im Gegensatz zu den bisherigen Analysen wurde unter Verwendung der nicht-aggregierten Daten ausschließlich jeweils die erste Versuchsfahrt untersucht. Mit diesen zusätzlichen Analysen sollte festgestellt werden, inwiefern die signifikanten Effekte in den aggregierten Daten mit Lerneffekten zu begründen sind. Sowohl für die erste NF als auch die erste AF Versuchsfahrt konnten keine signifikanten Effekte über den Zeitverlauf gefun-

den werden. Dies unterstützt die Annahme, dass die Signifikanzen in den aggregierten Daten über alle Versuchsfahrten tatsächlich auf Lerneffekte zurückzuführen sind. Ergänzend hierzu wurde deshalb für alle drei Signal-Gruppen die Verläufe der SuRT-Bearbeitung in der jeweils ersten Versuchsfahrt grafisch betrachtet (s. Abbildung 15).

Es zeigte sich deskriptiv, dass die Muster der SuRT-Bearbeitung in den Gruppen Signal *low* und *high* in diesen ersten Fahrten trotz möglicher Lerneffekte kongruent mit denen der aggregierten Daten über alle Fahrten sind (vgl. Abbildung 14). Aufgrund des erkennbaren Datenrauschens der geringeren Datenbasis von nur jeweils einer Versuchsfahrt erscheint es deshalb schlüssig, auf die aggregierten Daten zurückzugreifen. Die grundsätzlichen Schlussfolgerungen der bisher durchgeführten und der folgenden Analysen scheinen Gültigkeit zu besitzen.

4.3.4. Analyse der Fahrleistung nach der kritischen Fahrsituation bzw. nach der Übernahme der Fahraufgabe. Ein weiterer Analyseschritt umfasste die Untersuchung der Fahrleistung (M Dev) nach der kritischen Fahrsituation (der Übernahme der Fahraufgabe im AF) und des Einflusses der Signal-Gruppe auf die Fahrleistung. Zu diesem Zweck wurde pro Fahrttyp (NF, AF) jeweils eine ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjekt-Faktor Zeitpunkt (t_{+1} bis t_{+8}) und dem Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*) durchgeführt (s. Abbildung 16).

Die acht genannten Zeitpunkte wurden in die Analyse aufgenommen, um im AF pro Signal-Gruppe jeweils den Zeitpunkt der größten M Dev im direkten Anschluss an die Übernahme zu berücksichtigen. Für Signal *low*, war dieser Zeitpunkt bei t_{+7} (M Dev = -.29). In den anderen zwei Signal-Gruppen war dieser Zeitpunkt früher (Signal *no*: t_{+6} , M Dev = -.31; Signal *high*: t_{+6} , M Dev = -.16).

Für NF wurden keine signifikanten Effekte gefunden. D. h., die Fahrleistung veränderte sich in Abhängigkeit der untersuchten Faktoren auch nach der kritischen Fahrsituation nicht signifikant. Für den Fahrttyp AF zeigte die ANOVA für die Fahrleistung nach der Übernahme der Fahraufgabe einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Zeitpunkt ($F(7, 427) = 80.30, p \leq .001, \eta_p^2 = .57$) sowie eine signifikante Interaktion Zeitpunkt*Signal-Gruppe ($F(7, 427) = 8.66, p \leq .001, \eta_p^2 = .22$). Diese signifikante Interaktion zeigt, dass die Signal-Gruppe scheinbar einen Effekt auf den zeitlichen Verlauf der Fahrleistung nach der Übernahme der Fahraufgabe im Fahrttyp AF hatte. Aus

diesem Grund wurde als nächster Schritt im Fahrttyp AF für jeden Zeitpunkt (t_{+1} bis t_{+8}) eine einfaktorielte ANOVA mit dem Zwischensubjekt-Faktor Signal-Gruppe (Signal *no*, Signal *low*, Signal *high*) und der AV M Dev berechnet. Alle acht Analysen zeigten signifikante Effekte (alle $p \leq .001$). Angeschlossene post-hoc Tests (Bonferroni-korrigiert) zeigten, dass sich Signal *no* und Signal *low* zu keinem Zeitpunkt nach der Übernahme der Fahraufgabe signifikant unterschieden. In der Gruppe Signal *high* war die Fahrleistung zu jedem Zeitpunkt nach der Übernahme der Fahraufgabe signifikant besser als in Signal *no* (alle $p \leq .01$) und Signal *low* (alle $p \leq .05$).

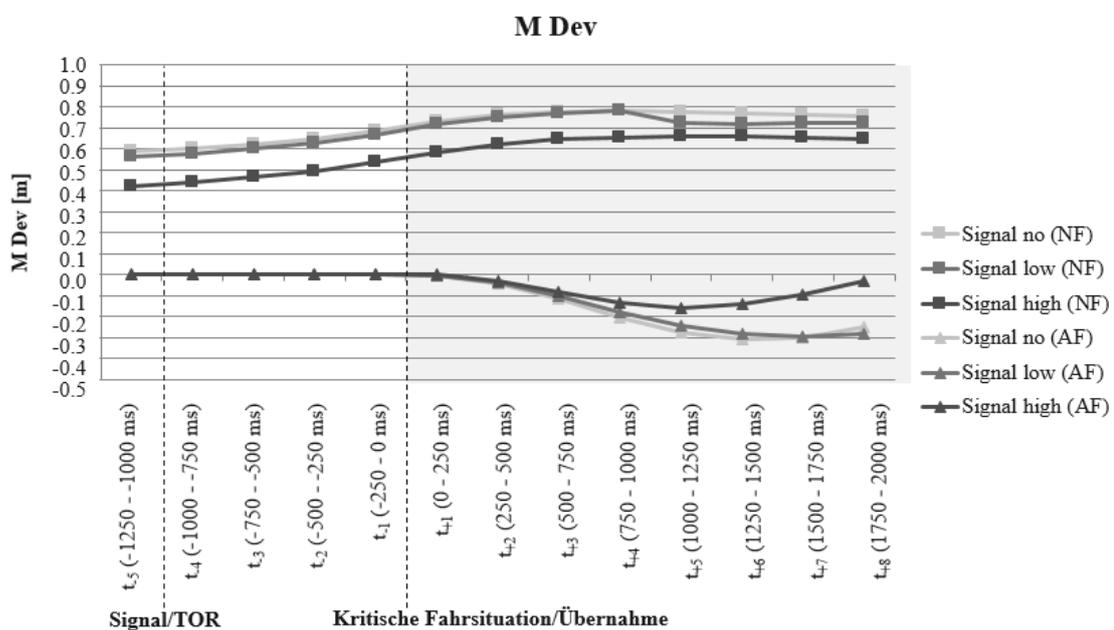


Abbildung 16. Fahrleistung in der kritischen Fahrsituation/der Übernahme-situation in Studie 1. Anmerkung. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrttyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal. Die grau hinterlegten Intervalle wurden in den inferenzstatistischen Analysen berücksichtigt. Eine positive M Dev zeigt eine Abweichung nach rechts, d. h. in Richtung des Standstreifens, und eine negative M Dev eine Abweichung nach links, d. h. in Richtung des linken Fahrstreifens, an.

4.3.5. Zusammenhang zwischen der SuRT-Aktivität und der Fahrleistung.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen einer Reduktion in der SuRT nach einem TOR- bzw. Warnsignal und der Fahrleistung nach der Übernahme bzw. der kritischen Fahrsituation wurde eine Korrelationsanalyse zwischen diesen zwei Größen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde pro Signal-Gruppe und Fahrttyp ein Mittelwert der SuRT-Aktivität der letzten fünf Intervalle vor der Übernahme/der kritischen Fahrsi-

tuation (t_{-5} bis t_{-1}) gebildet. Gleiches wurde für die M Dev nach der Übernahme/der kritischen Fahrsituation (t_{+1} bis t_{+8}) berechnet. Es wurden nicht-aggregierte Daten verwendet. D. h., pro Versuchsfahrt wurde jeweils ein separater Mittelwert für die SuRT bzw. für die M Dev berechnet. Dieses Vorgehen bot den Vorteil, dass die Daten der SuRT und der Fahraufgabe in den Korrelationsanalysen spezifisch für die Versuchsfahrt, aus der sie jeweils stammten, miteinander verglichen werden konnte. Die Verwendung aggregierter Daten hätte zur Verschleierung möglicher Effekte durch das Zusammenfassen mehrerer Fahrten führen können. Die Analysen wurden pro Signal-Gruppe und Fahrttyp durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Sie zeigen, dass es ausschließlich in der Gruppe Signal *high* signifikante Effekte ($p < .05$) gab.

Tabelle 8

Korrelation zwischen SuRT-Aktivität und Fahrleistung pro Fahrttyp und Signal-Gruppe in Studie 1

Signal	Fahrttyp	Pearson-Korrelation	Sig. (zweiseitig)
Signal <i>no</i>	NF	$r = .055$	<i>n. s.</i>
	AF	$r = -.101$	<i>n. s.</i>
Signal <i>low</i>	NF	$r = -.115$	<i>n. s.</i>
	AF	$r = -.166$	<i>n. s.</i>
Signal <i>high</i>	NF	$r = -.340$	$p \leq .01$
	AF	$r = -.277$	$p \leq .05$

Anmerkung. *n. s.* = nicht signifikant. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar, im Fahrttyp NF gemäß Instruktion ein Warnsignal.

4.3.6. Zusammenhang zwischen den Objektiv- und Subjektivdaten. Als letzter Schritt der Datenanalyse wurde die Subjektivfrage zur Übernahmeleistung der Versuchspersonen ausgewertet und mit den Objektivdaten des AF verglichen. Abbildung 17 beinhaltet eine grafische Darstellung der gegebenen Subjektivbewertungen pro Signal-Gruppe. Das Diagramm zeigt, dass ca. 40 % der Versuchspersonen in allen drei Signal-Gruppen angaben, die Fahrzeugführung sehr schnell übernommen zu haben.

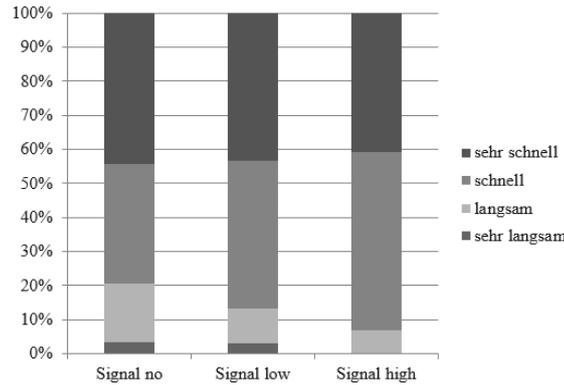


Abbildung 17. Subjektivbewertung der Übernahmeleistung (Schnelligkeit der fahrerseitigen Übernahme nach Systemdeaktivierung) in Studie 1. *Anmerkung.* Die Frage zur Übernahmeleistung wurde nur in AF Fahrten bewertet. Im Fahrttyp AF stellte das Signal den TOR dar.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dieser Subjektivbewertung und den Objektivdaten (Fahrdaten und SuRT-Inputs) wurden Korrelationen zwischen den verschiedenen Parametern berechnet. Wie zuvor wurden die nicht-aggregierten Daten herangezogen und für die SuRT die Intervalle t_{-5} bis t_{-1} und für die Fahraufgabe t_{+1} bis t_{+8} verwendet. Für diese Intervalle wurden erneut Mittelwerte der SuRT und der M Dev pro Versuchsfahrt und Signal-Gruppe berechnet. Die Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen zeigten signifikante Korrelationen zwischen der M Dev nach der Übernahme und der Subjektivbewertung für die Gruppe Signal *no* ($r = .294, p \leq .05$) und die Gruppe Signal *high* ($r = .297, p \leq .05$). Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge hinsichtlich der SuRT identifiziert werden.

4.4. Diskussion

Die Studie 1 der vorliegenden Dissertation diente der konfirmatorischen Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation, die durch eine Übernahmesituation des automatisierten Fahrens zum nicht-automatisierten Fahren operationalisiert wurde. Es wurde die Fragestellung untersucht, inwiefern Fahrerinnen und Fahrer tatsächlich den Situationsverlauf in einer dynamischen Fahrsituation antizipieren und ihr Verhalten hierauf anpassen, um somit eine sichere Fahrleistung (d. h. die Unfallvermeidung) zu garantieren. Über die Auswahl einer Übernahmesituation des automatisierten Fahrens als sich verändernde Fahrsituation wurde zudem die Prüfung der Verfügbarkeit der funktionalen Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren ermöglicht (erstes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.1).

Zur Spezifikation wurden basierend auf den Annahmen von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) vier Hypothesen abgeleitet, die im Rahmen einer Fahr-simulationsstudie untersucht wurden. Die Methoden und Ergebnisse dieser Studie wurden in vorangegangenen zwei Kapiteln ausführlich berichtet. Aufbauend hierauf werden im Folgenden diese vier Hypothesen beantwortet. Darüber hinaus findet eine inhaltliche und methodische Diskussion der Ergebnisse statt.

Eine erste Hypothese H1, die im Rahmen der Studie 1 überprüft wurde, lautete:

H1: Die Verwendung einer automatisierten Fahrfunktion führt innerhalb der Systemgrenzen zu einer erhöhten Bearbeitung einer FFT im Vergleich zu einer nicht-automatisierten Fahrt.

Die empirischen Erhebungen der Fahr-simulationsstudie können die Hypothese bestätigen. Es konnte eine erhöhte FFT-Aktivität in allen drei Signal-Gruppen im Rahmen der automatisierten Fahrt nachgewiesen werden (s. Abbildung 13). Somit stimmen diese Ergebnisse mit den Schlussfolgerungen bisheriger Studien überein (s. z. B. Griffiths & Gillespie, 2005; Jamson et al., 2013). Im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) und den von Voß und Schwalm (2015) getätigten Annahmen zum Fahrerverhalten im automatisierten Fahren (s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) scheinen die in Kapitel 4.1 formulierten Überlegungen zum Normalverkehr des automatisierten Fahrens folglich stimmig zu sein. Im automatisierten Fahren führte die durch das Wegfallen der Situationsfaktoren der Fahraufgabe reduzierte Belastung wiederum zu einer reduzierten fahrerseitigen Beanspruchung. Mit dem Ziel, ein mittleres Arousallevel beizubehalten, erhöhten Fahrerinnen und Fahrer tatsächlich die Ziele und Aktivität der FFT auf den Pfaden 1 und 3 des Arbeitsmodells.

Eine hieran angeschlossene Hypothese H2 fokussierte sich komplementär mit dem zu erwartenden Verhalten in der FFT im Falle einer fahrerseitigen Rückübernahme der Fahraufgabe im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) (s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7). Zur Vermeidung eines kognitiven Overloads in Übernahme-situationen des automatisierten Fahrens, in denen die Belastungsfaktoren der Fahraufgabe zu denen der FFT hinzukämen, wurde der umgekehrte Prozess zur Hypothese H1 (nämlich die proaktiven Rückanpassungen auf den Pfaden 1 und 3 der FFT) erwartet. Die Hypothese H2 lautete:

H2: In Vorbereitung auf eine Übernahme-situation von automatisiertem zu nicht-automatisiertem Fahren reduzieren Fahrerinnen und Fahrer nach einem TOR proaktiv die Bearbeitung einer FFT auf das Aktivitätslevel einer nicht-automatisierten Fahrt.

Die empirischen Daten der Studie 1 bestätigen diese Hypothese H2 (s. Abbildung 14 und Tabelle 6). Die Aktivität in der FFT wurde in allen drei Signal-Gruppen nach dem TOR-Signal noch vor der kritischen Fahrsituation, d. h. noch vor der Übernahme, auf das Level einer nicht-automatisierten Fahrt rückangepasst. D. h., es scheint tatsächlich so, als ob die Ziele der Fahraufgabe über die der FFT priorisiert und über die Pfade 1 und 3 des Arbeitsmodells kognitive Ressourcen für die Fahraufgabe freigegeben wurden (s. auch Hockey, 1997).

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Idee untersucht, dass besser ausgeprägte funktionale Verhaltensanpassungen in der FFT zu einer sichereren Fahrt im Sinne der Unfallvermeidung führen. Hypothese H3 fasste dies zusammen:

H3: Es gibt einen Zusammenhang zwischen der proaktiven FFT-Reduktion und der Übernahmequalität. Je stärker die FFT-Reduktion, desto besser ist die Übernahmequalität.

Die Studienergebnisse bestätigen diese Hypothese nur teilweise. Es ließ sich ausschließlich in der Gruppe Signal *high* ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Maß der FFT-Reduktion und der Übernahmeleistung feststellen (s. Tabelle 8). Die Bedeutung dieses Befundes für das Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen folgt im weiteren Kapitelverlauf zusammen mit den Schlussfolgerungen der Hypothese H4. Zur weiteren Untersuchung wurden neben den Objektivdaten auch die Subjektivratings der Versuchspersonen in die Betrachtungen mit einbezogen. Sie wiesen signifikante Zusammenhänge zwischen der subjektiv wahrgenommenen Qualität der Übernahme und der tatsächlichen Fahrleistung in den Gruppen Signal *no* und Signal *high* nach. Der Zusammenhang zwischen den Subjektivratings und der FFT-Reduktion war allerdings nicht signifikant. Bezogen auf das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) heißt dies, dass Fahrerinnen und Fahrer zwar ihre Fahrfähigkeiten an sich gut einschätzen können, dies aber nicht auf ihre funktionalen Verhaltensanpassungen zutrifft. Dies ist ein Indiz dafür, dass das fahrerseitige regulative Verhalten eher einen impliziten Prozess darstellt, der von Fahrerinnen und Fahrern zumindest teilweise nicht bewusst angesteuert wird.

Basierend auf bestehender Literatur (Gold et al., 2013; Naujoks et al., 2014), wurde schließlich die Idee untersucht, dass die funktionalen Verhaltensanpassungen durch verschiedene TOR unterschiedlich stark unterstützt werden. Hypothese H4 konkretisierte dies:

H4: Je höher die Salienz des TOR, desto stärker ist die proaktive FFT-Reduktion und desto besser ist die Übernahmequalität.

Die Studienergebnisse erlauben eine Bestätigung dieser Hypothese. Hinsichtlich der FFT galt, dass eine höhere Salienz des TOR zu einer früheren Reduktion der FFT führte (s. Abbildung 14 und Tabelle 7). Gleichmaßen zeigte sich in der Gruppe *Signal high* die beste Übernahmeleistung. Die Abweichungen nach links, d. h. in Richtung des anderen Fahrstreifens, waren am geringsten. Die Gruppen *Signal no* und *low* unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich der Fahrleistung (s. Abbildung 16). Zusammen mit den Ergebnissen der Hypothese H3 lassen diese Ergebnisse darauf schließen, dass ein wenig salienter TOR nicht ausreichend ist, um die von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten funktionalen Verhaltensanpassungen zufriedenstellend zu aktivieren. Im Sinne der Überlegungen von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) war nur der TOR in der Gruppe *Signal high* in der Lage, Fahrerinnen und Fahrer ausreichend gut in den Loop der Fahraufgabe zurückzuholen und die erforderlichen funktionalen Verhaltensanpassungen auf den Pfaden 1 und 3 aufzurufen. Folglich scheint nur ein hoch salienter TOR eine adäquate FFT-Reduktion zu unterstützen, die zu einer Freigabe kognitiver Ressourcen und einer möglichen Nutzung derselben für die Fahraufgabe führt. Diese Tatsache sollte bei der Auslegung automatisierter Systeme bzw. der Übernahmegestaltung berücksichtigt werden.

Insgesamt lieferte die vorliegende Studie 1 eine Vielzahl wichtiger Erkenntnisse zum Verständnis der funktionalen Verhaltensanpassungen im Kontext des automatisierten Fahrens und zur confirmatorischen Überprüfung bestehender Arbeiten in diesem Feld. Es scheint die funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation zu geben. Sie scheinen als regulativer Mechanismus der Unfallvermeidung zu greifen. Aufgrund des Studiendesigns ist darüber hinaus die Schlussfolgerung möglich, dass die funktionalen Verhaltensanpassungen gemäß Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) auch im automatisierten Fahren auftreten bzw. Fahrerinnen und Fahrern zur Verfügung stehen. Das Arbeitsmodell und die von Voß und Schwalm

(2015) postulierten Annahmen (s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) scheinen also auch in diesem Kontext Gültigkeit zu besitzen.

Zusätzlich zur Diskussion des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) bieten die Ergebnisse darüber hinaus die Möglichkeit, Empfehlungen zur Auslegung automatisierter Systeme abzuleiten. Diese Handlungsempfehlungen haben zum Ziel, die fahrerseitigen funktionalen Verhaltensanpassungen zu unterstützen und somit zur Unfallvermeidung im automatisierten Fahren beizutragen. Im Zuge dessen wurde bereits die Salienz des TOR genannt. Eine hohe Salienz des TOR ist scheinbar zur Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen erforderlich. Als mögliche Erklärung für dieses Verhalten kann eine schnellere Verschiebung des kognitiven Fokus von der FFT auf die Fahraufgabe angeführt werden. Darüber hinaus lassen sich weitere Empfehlungen ableiten. Erstens kann die benötigte Zeit zur Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen (d. h. im Falle der Studie die Zeit zum Angleich der FFT-Bearbeitung im automatisierten Fahren auf das Level des nicht-automatisierten Fahrens) als Indikator für das notwendige Zeitbudget eines TOR genutzt werden. D. h., zur Unterstützung der proaktiven FFT-Reduktion sollte der TOR ausreichend früh gegeben werden, sodass die Verhaltensanpassungen vollständig vollzogen werden können. Gleichermaßen sollte das Zeitintervall zwischen TOR und Übernahme nicht zu lange sein, sodass die FFT-Reduktion zwar abgeschlossen ist, die Übernahme aber noch nicht direkt erfolgt. Ein zu niedriges Arousallevel und eine erneute FFT-Erhöhung könnten die Folge sein. In dieser Diskussion der TOR-Zeiten könnte ein mögliches Problem zudem darin liegen, dass unterschiedliche FFT in der Praxis zu unterschiedlichen notwendigen Zeitbudgets führen können. Aus diesem Grund ist zu diskutieren, inwiefern Bereiche notwendiger Übernahmezeiten als sinnvollerer Maß im Vergleich zu diskreten TOR-Zeiten angeführt werden sollten. Als weiterer Punkt der Gestaltungsempfehlungen ist die „direktere“ Nutzung der funktionalen Verhaltensanpassungen in der FFT bei der Systemauslegung zu nennen. Ausgehend von der Idee, dass eine Angleichung der Aktivität der FFT im automatisierten Fahren auf das Level des nicht-automatisierten Fahrens als Indikator für eine sichere Fahrleistung und somit zur Unfallvermeidung herangezogen werden kann, ist eine gegenläufige Herangehensweise ebenfalls möglich. Eine unzureichende FFT-Anpassung, die durch das automatisierte System wahrgenommen werden sollte, könnte auf ein fehlendes fahrerseitiges Situationsbewusstsein und somit auf ein mögliches Unfallrisiko hindeuten. Es ist zu überlegen, ob das System in diesem

Fall für Fahrerinnen und Fahrer entscheiden und eine geplante Übernahme abbrechen sollte. Als Alternative sollte ein risikominimales Manöver eingeleitet werden, in welchem das Fahrzeug zum Stillstand gebracht würde (Gasser et al., 2012).

Ungeachtet dieser vielen (praxis-) relevanten Ergebnisse der Studie 1 existieren verschiedene methodische Details, die im Rahmen einer kritischen Reflexion näher betrachtet werden sollten. Erstens ist die Länge der einzelnen Fahrten zu diskutieren. Ein möglicher Kritikpunkt ist, dass die Fahrlänge jeweils zu kurz zum Erlangen eines fahrerseitigen Verständnisses für den Fahrmodus, und insbesondere für das automatisierte Fahren, gewesen sein könnte. Dieser Punkt ist insofern zu entkräften, als dass die Ergebnisse bezüglich Hypothese H1 zeigten, dass im Normalverkehr des automatisierten Fahrens eine signifikant erhöhte FFT-Aktivität auftrat. Ein solches Verhalten war im Grunde nur zu erwarten, wenn Fahrerinnen und Fahrer sich den Umständen des Fahrmodus bewusst waren und ihr Verhalten hierauf anpassten. Zweitens ist zu hinterfragen, inwiefern die Effekte der FFT in einer Instruktion der verschiedenen Aufgaben begründet waren. Da die Instruktion der Studie jedoch explizit keine Aufgabenpriorisierung vorgab, ist dieser Punkt zu vernachlässigen. Darüber hinaus könnte diskutiert werden, dass die gefundenen Effekte zwischen den Signal-Gruppen (H3 und H4) auf methodische Artefakte zurückzuführen sind. Zum einen könnte das Signal *low* im Vergleich zum Signal *high* schlechter wahrgenommen worden sein (d. h., nicht immer gehört worden sein). Dies konnte allerdings über eine vorgelagerte Kontrollfrage zur Wahrnehmung widerlegt werden. Zum anderen könnte es Gruppenunterschiede in den Fähigkeiten in den zu bearbeitenden Aufgaben (Fahraufgabe und FFT) gegeben haben. Auch dieser Punkt lässt sich über die empirischen Daten widerlegen. Im Normalverkehr gab es keine Unterschiede in der FFT-Bearbeitung zwischen den Signal-Gruppen (s. Abbildung 13) und im nicht-automatisierten Fahren existierten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Fahrleistung in der kritischen Fahrsituation (Kurve). Als weiterer Aspekt der methodischen Reflexion ist die Aufbereitung der SuRT bzw. die gewählte Länge der Intervalle zu diskutieren. Möglicherweise war die Intervalllänge von 250 ms zu feinauflösend, um die tatsächliche Bearbeitungsfrequenz in der SuRT abbilden zu können. Es ist zu diskutieren, ob die Bearbeitung eines SuRT-Trials mehr Zeit in Anspruch nimmt und somit ausbleibende oder variierende Eingaben in der gewählten Intervalllänge ein Artefakt sein könnten. Dieser Punkt sollte in weiteren Studien, die einen ähnlichen Fokus haben, berücksichtigt werden, indem die Länge der

Intervalle erhöht wird. Ein letzter Punkt, der im Rahmen der Methodenkritik anzubringen ist, sind die Lerneffekte, die über den Studienverlauf festgestellt werden konnten. Auch in der Signal *no*-Gruppe, in der keine FFT-Reduktionen zu erwarten waren, fanden laut den aggregierten Daten Anpassungen vor der Übernahme der Fahraufgabe statt (s. Abbildung 14). Zusätzliche Analysen der ersten Fahrten in der Signal *no*-Gruppe wiesen darauf hin, dass diese Effekte auf Lern- bzw. Gewöhnungseffekte zurückzuführen waren. In den ersten Fahrten fanden sich nämlich keine solchen proaktiven Anpassungen in der FFT. Eine deshalb angeschlossene grafische Betrachtung der ersten Versuchsfahrten der anderen beiden Signal-Gruppen legte allerdings nahe, dass die Lerneffekte für diese beiden Gruppen nicht die grundsätzliche Aussage verzerren, sondern die Verwendung der aggregierten Daten aufgrund der Messwiederholung eher die statistische Aussagekraft der Analysen erhöhte.

Die Darstellung der Studie 1 abrundend lässt sich festhalten, dass es funktionale Verhaltensanpassungen zur Unfallvermeidung in einer sich verändernden Fahrsituation auch im Kontext des automatisierten Fahrens gibt. Es konnte somit empirischer Nachweis im ersten der drei identifizierten offenen Forschungsfelder im Hinblick auf die funktionalen Verhaltensanpassungen (s. Kapitel 3.1.1) erbracht werden. Gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) erscheint allerdings nicht nur diese Komponente als relevant. Es wird darüber hinaus theoriebasiert angenommen, dass auch die subjektive Fahrleistungsbewertung ein relevanter auslösender Faktor der funktionalen Verhaltensanpassungen sein kann. Dieser Zweig des Arbeitsmodells benötigt allerdings noch empirischer Verifikation. Aufbauend auf den Erkenntnissen und der methodischen Herangehensweise der aktuellen Studie 1 wird deshalb im weiteren Verlauf der Dissertation auf diesen Punkt eingegangen. Die Studien 2 bis 4 dienten der Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung (s. Kapitel 5-7). Die Studien 5 und 6 untersuchten anschließend empirisch den angenommenen Zusammenhang zwischen der subjektiven Fahrleistungsbewertung und der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen (s. Kapitel 8 und 9). Teile der Methodik (z. B. die Wahl der FFT) sowie des Auswertungsvorgehens (z. B. Analyse der Objektivdaten über den Zeitverlauf) wurden dabei von der aktuellen Studie 1 übernommen.

5. Studie 2 – Untersuchung und Erfassung einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0614/2014 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0614/2014.

The author is solely responsible for the content.

5.1. Zielsetzung und Hypothesen

Während die zuvor berichtete Studie 1 sich mit den funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation beschäftigte, untersuchte die Studie 2 der vorliegenden Dissertation eine weitere Komponente des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015). Diese Komponente ist die subjektive Fahrleistungsbewertung (s. Kapitel 3.2.2 und Abbildung 8, rote Hervorhebung). Sie stellt das zweite, identifizierte offene Forschungsfeld ausgehend von der bestehenden Literatur dar (s. Kapitel 3.1.2). Da nach bestem Wissen der Autorin aktuell ein ganzheitliches Modell zur Konzeptualisierung derselben fehlt, wurde die Fragestellung untersucht, wie die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, die sowohl die Längs- als auch die Querregelung umfasst, konzeptualisiert und messbar gemacht werden kann. Die empirische Untersuchung der Fragestellung wurde von der Autorin der vorliegenden Dissertation im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2017) und war unter Anleitung der Autorin Gegenstand der unveröffentlichten studentischen Arbeiten von von Salm-Hoogstraeten (2015) und Herzberger (2015).

Wie auch in Studie 1 wurde die allgemeine Fragestellung über zu überprüfende Hypothesen konkretisiert. Kapitel 2.5.1 zeigte, dass bereits verschiedene Autorinnen und Autoren die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, zwar zumeist begrenzt auf die Längsführung, untersuchten (z. B. Dick, 2001; 2002; Eberl, 2014; Engelbrecht et al., 2009; Grzesik, 2009; Popiv, 2012; Winner, 2012). Sie leiteten Komponenten bzw.

Faktoren ab, die zur Konzeptualisierung dieser Komponente des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) herangezogen werden könnten. Ausgehend hiervon ist anzunehmen, dass auch ein ganzheitliches Konstrukt der subjektiven Fahrleistungsbewertung, welches die Längs- und Querregelung umfasst, über eine Faktorenstruktur und zugehörige Attribute beschreiben lässt. Dies ist in H1 zusammengefasst:

H1: Die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, die sowohl die Längs- als auch die Querregelung umfasst, lässt sich über das Faktorenkonstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung sowie zugehörigere Attribute erfassen.

Obwohl bisherige Arbeiten zur subjektiven Fahrleistungsbewertung keine Messmethodik zur Quantifizierung der subjektiven Fahrleistungsbewertung bereitstellen (s. Kapitel 3.1), liegt die Annahme nahe, dass ein solches Instrument ausgehend von einem klar definierten Faktorenkonstrukt abgeleitet werden kann. H2 konkretisiert dies:

H2: Ausgehend vom Faktorenkonstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung lässt sich eine Messmethodik zur Erfassung der ganzheitlichen subjektiven Fahrleistungsbewertung ableiten.

Zur Prüfung dieser zwei Hypothesen und zur Beantwortung der übergeordneten Fragestellung wurde eine vierstufige Methodenabfolge gewählt (s. Abbildung 18), deren Inhalte in den nächsten Unterkapiteln beschrieben sind.

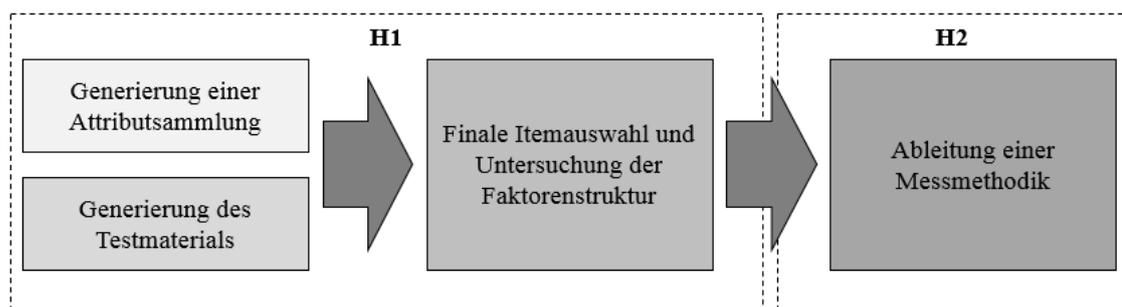


Abbildung 18. Vierstufige Methodenabfolge der Studie 2

Zunächst wurden mögliche Attribute des Konstrukts der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung gesammelt (Kapitel 5.2). Anschließend wurde das Testmaterial, das zur näheren Untersuchung des Konstrukts benötigt wurde, generiert (Kapitel 5.3). In Schritt 3 wurden anschließend die trennscharfen Items des Konstrukts bestimmt und die Faktorenstruktur untersucht (Kapitel 5.4). Anschließend wurde, im Sin-

ne von H2, eine Messmethodik abgeleitet (Kapitel 5.5). Ein abschließendes Kapitel umfasst die Diskussion der erlangten Ergebnisse (Kapitel 5.6).

5.2. Generierung einer Attributsammlung zum Konstrukt subjektiv angemessen empfundene Fahrleistung

Wie zuvor erwähnt, war ein erster Schritt in Studie 2 die Generierung einer Attributsammlung zum Konstrukt der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Hierzu wurden eine Literaturrecherche, eine Online-Studie sowie ein abschließendes Expert-Card Sorting durchgeführt. In den folgenden Abschnitten sind diese einzelnen Elemente detailliert beschrieben.

5.2.1. Literaturrecherche. Zur Generierung einer Begriffs- bzw. Attributsammlung, die eine erschöpfende Beschreibung des Konstrukts der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung liefert, wurde zunächst eine Literaturrecherche mit nationalen sowie internationalen Quellen durchgeführt.

5.2.1.1. Methode. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden verschiedene virtuelle Datenbanken (Google Scholar, PsychInfo, Web of Science und Science Direct) verwendet. Die Recherche erfolgte sowohl in deutscher als auch englischer Sprache. Verwendete Suchbegriffe waren u. a. Fahrleistung, subjektive Fahrleistungsbewertung, Fahrsicherheit oder Fahrgefühl.

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits angedeutet wurde, scheint das auf Längs- und Querführung bezogene Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung nach bestem Wissen der Autorin noch nicht vollständig definiert und ausgearbeitet zu sein. Daher wurden alle Attribute, die grob mit dem Konstrukt verknüpft sind, aus der Literatur extrahiert. So wurden beispielsweise Begriffe in der Sammlung erfasst, die aus Definitionen vergleichbarer Konzepte wie dem Handling von PKW (Riedel, 2000) oder des Fahrerlebens (Eberl, 2014) stammen. Diese erste Zusammenstellung enthielt Adjektive, Substantive und Teilsätze auf Deutsch und Englisch. Zur Erstellung eines einheitlichen Formats wurden die entnommenen Begrifflichkeiten, wenn nötig, umformuliert und in Adjektive in deutscher Sprache übersetzt. Alle Begriffe, für die eine Umformulierung nicht möglich bzw. sinnvoll erschien, wurden in den Folgeschritten nicht weiter berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wurden die verbleibenden Attribute hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung überprüft. Hierzu erhielten drei Expertinnen (Angestellte der Abteilung „Kfz-Systembewertung“ des ika der RWTH Aachen University) die Liste der Attribute. Ihre Aufgabe bestand darin, mittels einer binären Variablen anzugeben, inwiefern die Attribute jeweils zur Beschreibung des Konstrukts geeignet oder ungeeignet waren. Die Expertinnen erhielten keine Incentivierung. Alle Attribute, die von mindestens zwei Expertinnen als ungeeignet klassifiziert wurden, wurden in den weiteren Schritten nicht berücksichtigt. Zum Abschluss der literaturbasierten Sammlung der Attribute wurden alle Duplikate (d. h., identische Wörter, die sich mehrfach in der Liste befanden) aus der Wortsammlung entfernt.

5.2.1.2. Ergebnisse. Die initiale Begriffssammlung ergab 538 umformulierte und übersetzte Adjektive aus 52 wissenschaftlichen Quellen (z. B. Breuer, 2000; Krüger, Neukum, & Schuller, 1999; Riedel, 2000; Rösler, 2009). Von diesen klassifizierten die Expertinnen 173 Attribute für die Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung als ungeeignet (z. B. „dominant“, „unattraktiv“, „plump“). Folglich wurden sie aus der Attributsammlung entfernt. Beispiele für Attribute, die als geeignet eingestuft wurden, sind „aggressiv“, „direkt“ und „harmonisch“. Innerhalb dieser verbleibenden Sammlung geeigneter Attribute wurden „sicher“ und „komfortabel“ am häufigsten genannt (jeweils 14 Einträge). Weniger häufige Attribute wie „schwerfällig“ wurden nur einmal erwähnt. Der letzte Schritt, die Eliminierung von Duplikaten, führte zu einem Satz von 269 relevanten Attributen für die Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung (s. Anhang A).

5.2.2. Online-Studie. Da das Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung bisher unzureichend definiert zu sein scheint (s. Kapitel 3.1), konnte die Literaturrecherche nur eine Liste von Attributen liefern, die von ähnlichen Konstrukten stammen. Diese müssen allerdings nicht vollständig zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung geeignet sein. Zur Überwindung dieser Restriktion wurde eine zusätzliche generische Online-Studie durchgeführt. Das Hauptziel dieses Schrittes war, auf eine Quelle von potenziellen Attributen zuzugreifen, die das Konstrukt direkt beschreiben können. In dieser Online-

Studie war es die Aufgabe der Versuchspersonen, zwei Videosequenzen simulierter Fahrten zu betrachten und subjektiv wahrgenommene Unterschiede in den gesehenen Fahrleistungen über Begriffe zu beschreiben.

5.2.2.1. Methode. Die Online-Umfrage lief über die Fragebogen-Software Survey Monkey® (Finley & Finley, 2015). In der Befragung sahen die Teilnehmenden zwei 30-sekündige Videos. Die Videos zeigten Fahrsequenzen, die aus der Fahrerperspektive gefilmt wurden. Die Videos wurden mit der Software Silab 4.0 (WIVW GmbH, Veitshöchheim, Germany) erzeugt. Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation unter Anleitung der Autorin als Gegenstand der unveröffentlichten studentischen Arbeit von Rohrbeck und Swierc (2015) ein Java-Tool entwickelt, welches ermöglicht, bestimmte Fahrzeugparameter der Lateral- und Longitudinalführung (z. B. Geschwindigkeit, Lateralversatz, Schwingungsverhalten, Kurvenschneiden etc.) sowie ausgewählte Situationsfaktoren (Fahrzeugklasse und Aufkommen des Gegenverkehrs, Wetter, Tageszeit, Streckenverlauf etc.) aufwandsreduziert und reproduzierbar in der Silab 4.0 Software zu manipulieren. Abbildung 19 zeigt einen Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) dieses Java-Tools.

In beiden für die Online-Studie über dieses Tool erzeugten Videos bewegte sich das Ego-Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h auf einer Landstraße. Die Videos enthielten entgegenkommenden, aber keinen mitfließenden Verkehr. Das Ego-Fahrzeug hatte keinen statischen Lateralversatz von der Fahrstreifenmitte. Allerdings pendelte es mit einer Amplitude von 30 cm sowie einer Periodendauer von 40 s. Dabei gab die Amplitude an, wie weit das Fahrzeug maximal von der Fahrstreifenmitte nach links und rechts abwich. Die Periodendauer war ein Maß für die Änderungsrate. Je höher die Periodendauer war, desto kleiner war die Frequenz, mit der das Fahrzeug schwang. Diese leichte Schwingung wurde basierend auf der Annahme, dass menschliches Fahrverhalten normalerweise immer zumindest einer minimalen lateralen Variation unterliegt, implementiert. Eines der Videos sollte eine gute Fahrleistung darstellen, während das andere eine schlechte Fahrleistung repräsentieren sollte. Eine zweite, überlagernde Schwingung ermöglichte diese Unterscheidung. In der Bedingung der guten Fahrleistung war diese zweite Schwingung sehr leicht. Sie hatte eine Amplitude von 10 cm und eine Periodendauer von 30 s. Bei der schlechten Fahrleistung war sie deutlich stärker. Dies basierte auf der Annahme, dass eine starke und häufige laterale

Schwingung mit einer schlechten menschlichen Fahrleistung zusammenhängt. Die Schwingung hatte eine Amplitude von 60 cm und eine Periodendauer von 5 s.

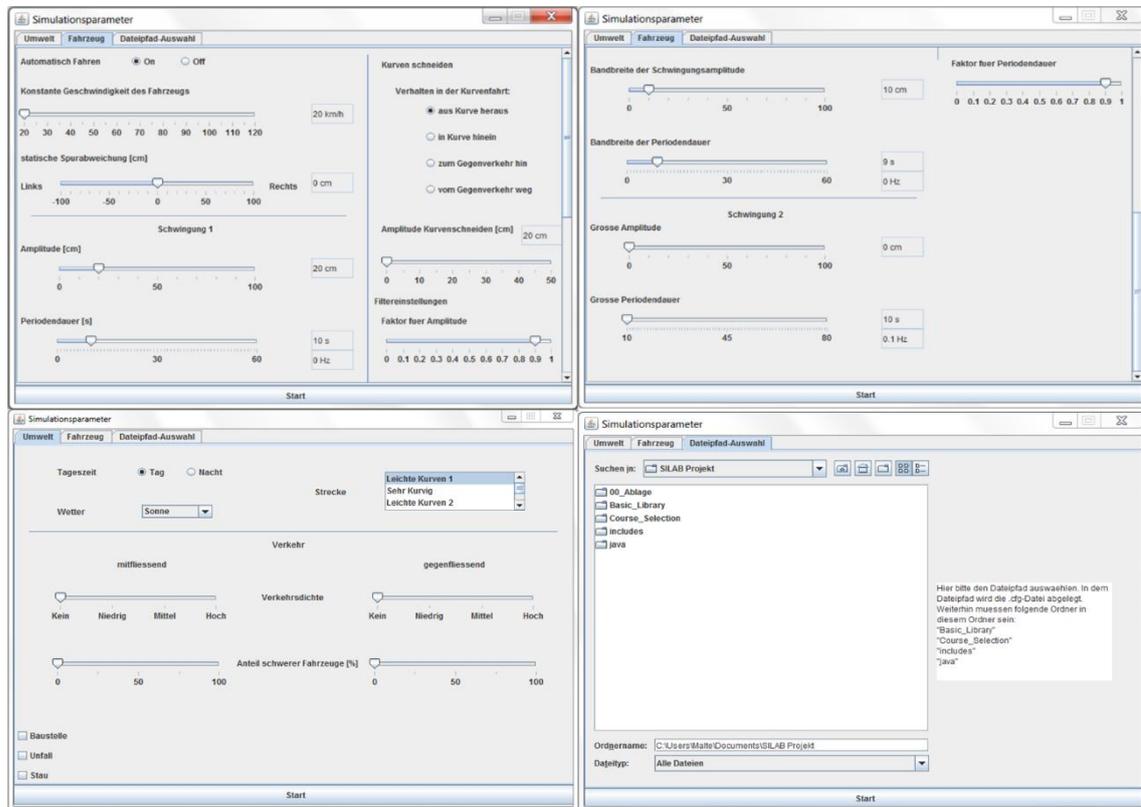


Abbildung 19. Screenshot des im Rahmen der Dissertation entwickelten Java-Tools zur Manipulation von Fahrzeug- und Umgebungsfaktoren in der Simulationssoftware Silab 4.0 (WIVW GmbH, Veitshöchheim, Germany)

Mit dem Ziel, unterschiedliche Situationen abzudecken, wurden die Wetterbedingungen manipuliert (sonnig, regnerisch und neblig, s. Abbildung 20). Sowohl die gute als auch die schlechte Fahrleistung wurden in allen drei Wetterbedingungen realisiert. Insgesamt ergaben sich hieraus folglich sechs Videosequenzen.



Abbildung 20. Wetterbedingungen der Fahrleistungsvideos der Online-Studie der Studie 2

Abbildung 20 zeigt die Videoperspektive der resultierenden Fahrsequenzen. In der ausgewählten Kameraperspektive waren keine in der Realität vorhandenen Fahrzeugkomponenten, wie z. B. die Motorhaube, sichtbar. Zur Überprüfung, inwiefern ein solcher fehlender Referenzpunkt Einfluss auf die subjektive Fahrleistungsbewertung hatte, wurde eine Vorstudie durchgeführt. In dieser bewerteten Versuchspersonen die in zwei Videosequenzen gezeigten Fahrleistungen hinsichtlich ihrer Angemessenheit. Während die Fahrleistungen identisch waren, wurde die Sichtbarkeit des Fahrzeugcockpits als Referenzpunkt manipuliert. Es zeigten sich keine Unterschiede in der Bewertung. Als solches erscheint es unwahrscheinlich, dass ohne einen in der Realität vorhandenen Referenzpunkt eines Fahrzeugcockpits Beeinflussungen bzw. Verzerrungen der subjektiven Fahrleistungswahrnehmung bzw. -bewertung entstehen. Es kann folglich das Testmaterial ohne Referenzpunkt verwendet werden.

Der Fragebogen der Studie 2 wurde auf verschiedenen Online-Plattformen und sozialen Netzwerken veröffentlicht. Jede Versuchsperson erlebte sowohl die gute als auch die schlechte Fahrleistung (Innersubjekt-Faktor Qualität der Fahrleistung). Jeweils ein Drittel der Originalstichprobe sah die zwei Videos entweder im sonnigen, regnerischen oder nebligen Szenario (Zwischensubjekt-Faktor Wetter). Insgesamt stellte die Studie ein 2×3 faktorielles Design dar. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, von ihnen wahrgenommene Unterschiede zwischen den beiden Fahrleistungen in ihren eigenen Worten zu beschreiben. Es war möglich, die Videos so oft wie gewünscht abzuspielen.

Die Stichprobe bestand aus $N = 151$ Teilnehmenden, die alle einen gültigen Führerschein besaßen. Aufgrund von Unvollständigkeit wurden 43 Datensätze von der Analyse ausgeschlossen. Folglich umfasste der finale Datensatz $N = 108$ ($n = 33$ weiblich) Teilnehmende. Diese waren im Mittel $M = 24$ Jahre alt ($SD = 6$) und waren seit ca. $M = 7$ Jahren im Besitz eines gültigen Führerscheins ($SD = 6$). Die Verteilung der finalen Stichprobe über die drei Wetterszenarien war wie folgt: $n = 26$ (24 %) sahen die sonnige, $n = 37$ (34 %) die neblige und $n = 45$ (42 %) die regnerische Bedingung. Die Teilnehmenden erhielten keine Incentivierung.

Das Auswertungsvorgehen der Online-Studie war dem der Literaturrecherche ähnlich. Zunächst prüften zwei Expertinnen (Angestellte der Abteilung „Kfz-Systembewertung“ des ika) die Antworten der Teilnehmenden auf ihre Eignung, das Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zu beschreiben. Zu

diesem Zweck erhielten sie jeweils eine Liste aller generierten Attribute. Es war die Aufgabe der Expertinnen, auf einer binären Variablen anzugeben, ob jedes Attribut zur Beschreibung des Konstrukts geeignet oder ungeeignet war. Auch hier erhielten die Expertinnen keine Incentivierung. Für den Fall, dass beide Expertinnen ein Attribut als ungeeignet einstufen, wurde es in den weiteren methodischen Schritten nicht berücksichtigt. Die verbleibenden Antworten wurden in Adjektive umgewandelt. Wie bei der Literaturrecherche wurden dann in einem zweiten Schritt alle Duplikate aus der Sammlung eliminiert.

5.2.2.2. Ergebnisse. Die Online-Studie resultierte in einer anfänglichen Attribut-sammlung von 537 Begriffen. 121 Attribute wurden von den Expertinnen zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung als ungeeignet eingestuft (z. B. „Aquaplaning“, „Lenkradführung“, „Verhalten“). Die Expertinnen klassifizierten 416 der Attribute als geeignet (z. B. „dynamisch“, „aufmerksam“ und „kontrolliert“). In der Sammlung wurde „schlangenlinienfahrend“ (35 Einträge), „gefährlich“ (30 Einträge) und „unsicher“ (23 Einträge) am häufigsten genannt. Andere Begriffe wie „abwechselnd“ und „ruppig“ wurden nur einmal genannt. Nach dem Entfernen aller Duplikate verblieben 138 Attribute in der Sammlung (s. Anhang B).

5.2.3. Expert Card Sorting. Zusammen ergaben die Literaturrecherche und die Online-Studie 407 Attribute. Zur Strukturierung und Reduzierung dieser Sammlung war die Expert Card Sorting Methode (Spencer & Garrett, 2009) ein nächster methodischer Schritt. Das Vorgehen und die Ergebnisse dessen sind im Folgenden berichtet.

5.2.3.1. Methode. Zunächst führten zwei Expertinnen und ein Experte (Angestellte der Abteilung „Kfz-Systembewertung“ des ika) das Card Sorting einzeln durch. Sie erhielten die Anweisungen, (a) alle Attribute zu eliminieren, die das Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung nicht ausreichend beschreiben; (b) ähnliche Attribute zu gruppieren; sowie (c) Redundanzen zu erkennen und das im Sprachgebrauch häufiger verwendete Wort auszuwählen. In einem weiteren Schritt wurden die erlangten Ergebnisse für ein abschließendes Card Sorting zusammengeführt. Dieses wurde von einer weiteren Expertin (Angestellte der Abteilung „Kfz-Systembewertung“ des ika) durchgeführt. Mit diesem letzten Schritt wurde angestrebt,

alle verbleibenden Redundanzen zu eliminieren und eine endgültige Sammlung von Attributen zur Konstruktbeschreibung zu spezifizieren. Es wurde keine Incentivierung gezahlt.

5.2.3.2. Ergebnisse. Im ersten Schritt generierte jeder Experte bzw. jede Expertin eine separate, reduzierte Attributsammlung für die Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Experte/Expertin 1 wählte 119 Begriffe für die Sammlung aus, Experte/Expertin 2 60 und das Card Sorting von Experte/Expertin 3 resultierte in 149 Attributen. Das finale Card Sorting des zweiten Schritts führte zu einer Sammlung von 115 Attributen (s. Anhang C).

5.3. Generierung des Testmaterials

Das Hauptziel der Studie 2 war es, die Definition und Erfassung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde im vorherigen Schritt bereits eine umfangreiche Sammlung potenzieller Attribute generiert. Zur Auswahl der trennscharfen Items und zur Untersuchung der Faktorenstruktur des Konstrukts wurde in einem nächsten Schritt (s. Abbildung 18) ein Extremgruppenvergleich durchgeführt. Gemäß diesem Ansatz wurde eine gute, d. h. eine regel- und komfortkonforme Fahrleistung, mit einer schlechten Fahrleistung verglichen. Die Items, die am besten zwischen diesen beiden Fahrleistungen unterscheiden konnten, ließen sich als relevante Items des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung auswählen. Im aktuellen Kapitel wird die Erstellung des für diesen Extremgruppenvergleich benötigten Testmaterials näher beschrieben (s. Abbildung 18).

Zur Vermeidung von Zirkularität durch die Verwendung des gleichen Testmaterials für die Generierung und Prüfung der Attributsammlung wurde entschieden, für diesen zweiten Schritt neues Testmaterial zu verwenden. Ziel war es zudem, realistischeres Testmaterial zu nutzen. Dabei wurde im Vergleich zu den Datenerhebungen des Kapitels 5.2.2, bei denen die Erstellung der Videos guter und schlechter Fahrleistung auf eigenen Annahmen beruhte, für den Extremgruppenvergleich ein anderer Ansatz zur Definition guter und schlechter Fahrleistungen verfolgt. Zu diesem Zweck wurden zunächst in einer Expertenbefragung die Kriterien schlechter Fahrleistungen abgeleitet. Eine gute Fahrleistung wurde mit einer sicheren und regelkonformen Fahrleistung

gleichgesetzt, bei der die Kriterien schlechter Fahrleistungen nicht auftreten. Darauf aufbauend folgte die Erstellung zweier Videosequenzen, welche die beiden Arten von Fahrleistungen darstellten. Zuletzt wurde empirisch überprüft, ob die aufgezeichneten Videos die Anforderungen der Definitionen einer guten und einer schlechten Fahrleistung ausreichend erfüllten. Im Folgenden sind die Inhalte dieser einzelnen Schritte (Expertenbefragung, Videoaufzeichnungen, Manipulationscheck) berichtet.

5.3.1. Expertenbefragung. In einem ersten Schritt sammelten Expertinnen und Experten, die sich mit objektiven Fahrtrajektorien bzw. der subjektiven Evaluation dieser beschäftigen, Kriterien zur Beschreibung schlechter Fahrleistungen.

5.3.1.1. Methode. Die Aufgabe der Expertinnen und Experten war es, einen paper-pencil Fragebogen, in welchem Aspekte schlechter Fahrleistung sowohl für Längs- als auch Querregelung gesammelt wurden, zu beantworten. Wie bei den Erhebungen des Kapitels 5.2.3 wurde keine Incentivierung gezahlt. $N = 19$ Personen ($n = 4$ weiblich) nahmen an der Umfrage teil. Im Durchschnitt waren sie $M = 31$ Jahre alt ($SD = 5$). Alle Expertinnen und Experten waren Angestellte des ika. Sie arbeiteten im Durchschnitt bereits $M = 4$ Jahre in ihrem Themenfeld ($SD = 4$).

5.3.1.2. Ergebnisse. Die Expertinnen und Experten generierten 37 Kriterien schlechter Fahrleistung für die Längsführung (z. B. zu dichtes Auffahren auf Vorderfahrzeug, s. Tabelle 25 in Anhang D) und 29 Kriterien für die Querführung (z. B. abrupte Spurwechsel, s. Tabelle 26 in Anhang D). Zur Strukturierung dieser zwei Listen wurden zunächst thematisch ähnliche Kriterien zusammengefasst. Zweitens wurden diese Cluster nach ihrem gemeinsamen Thema benannt. Die Kriterien der Längsführung ließen sich fünf Clustern zuweisen. Die Kriterien der Querführung wurden in vier Clustern zusammengefasst (s. Tabelle 9).

Tabelle 9

Cluster schlechter Fahrleistung in Studie 2

Längsführung	Querführung
Bremsvorgang	Gefährdung
Abstand	Spur
Schaltung	Lenkvorgang
Geschwindigkeit	Laterale technische Parameter (z. B.
Longitudinale technische Parameter (z. B. hohe Totzeit zwischen Eingabe Fahrerwunsch und Reaktion des Fahrzeugs)	Übersteuerungstendenz)

5.3.2. Videoaufzeichnungen. Ein nächster Schritt beschäftigte sich mit der Aufzeichnung der Videosequenzen. Zur Erstellung von Videos mit realistischen Fahrleistungen, die nicht zu lang waren, wurden die realistischsten und die am besten darstellbaren Cluster und Kriterien in die Videos aufgenommen. Tabelle 10 beinhaltet eine Liste der Kriterien, die letztendlich berücksichtigt wurden.

Tabelle 10

Ausgewählte Kriterien für die Fahrmanöver in den Videosequenzen in Studie 2

Längsrichtung	Querrichtung
Sehr/zu starke Beschleunigung	Ruckartige/abrupte Lenkbewegungen
Zu dichtes Auffahren auf Vorderfahrzeug	Pendeln in der Spur
Häufige Wechsel zwischen Bremsen und Beschleunigen	Überfahren der Seitenlinie

Mit dem Ziel, einen realistischen Fahreindruck zu vermitteln, wurden die Videosequenzen in realen Fahrsituationen auf einer Teststrecke (Testgelände der FTL GmbH Film + Test Location bei Aldenhoven) aufgezeichnet. Die Teststrecke stellt eine zweispurige Autobahn mit Leitplanke und Standstreifen dar. In beiden Szenarien (gute und schlechte Fahrleistung), die jeweils eine Dauer von 25 s hatten, fuhren zwei Fahrzeuge ohne zusätzlichen Verkehr auf einer 600 m geradeausführenden zweispurigen Autobahn. Das erste Fahrzeug fuhr mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h in der Mitte des rechten Fahrstreifens. Das zweite, nachfolgende Fahrzeug führte die in Tabelle 10 definierten Fahrmanöver durch, um den Eindruck guter bzw. schlechter Fahrleistung zu erzeugen. Die Videosequenzen wurden aus der Fahrerperspektive aus diesem Folgefahrzeug aufgenommen. Es war mit einer Kamera über dem Lenkrad aus-

gestattet. Um Referenzpunkte innerhalb der Videosequenzen zu geben, waren das Armaturenbrett und die A-Säule innerhalb des Sichtfelds der Kamera (s. Abbildung 21).



Abbildung 21. Aufbau und Szenario der gefilmten Fahrsituation in Studie 2

In dem Video, das eine schlechte Fahrleistung zeigt, führte das zweite, folgende Fahrzeug die Fahrmanöver gemäß Tabelle 10 durch. Dabei wurden zunächst die Kriterien der Querführung und dann die der Längsführung ausgeführt. Um die Fahrsequenz realistischer wirken zu lassen, führte das Folgefahrzeug zum Abschluss ein sicheres Überholmanöver aus. Im Video der guten Fahrleistung absolvierte das Folgefahrzeug eine regelkonforme Fahrt, bei der die sechs Kriterien schlechter Fahrleistung (s. Tabelle 10) nicht auftraten. Es folgte dem ersten Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit und ausreichender Entfernung. Außerdem fuhr es in der Mitte des Fahrstreifens. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den beiden Videosequenzen endete auch dieses Video einer guten Fahrleistung mit einem sicheren Überholvorgang.

5.3.3. Manipulationscheck. Zur Überprüfung, inwiefern die angestrebte Manipulation (d. h. die Generierung eines Videos mit einer guten und eines mit einer schlechten Fahrleistung) im aufgezeichneten Material erfolgreich war, wurde eine empirische Studie durchgeführt. Es wurde geprüft, ob die sechs Kriterien schlechter Fahrleistung (s. Tabelle 10) bei den zwei Videosequenzen signifikant unterschiedlich bewertet wurden. Sofern dies zuträfe, könnte die Manipulation als erfolgreich erachtet werden.

5.3.3.1. Methode. Die Studie war eine Online-Umfrage, die mit der Software Survey Monkey® (Finley & Finley, 2015) erstellt wurde. In dieser Umfrage wurden den Teilnehmenden die zwei Videosequenzen auf zwei aufeinanderfolgenden Seiten präsentiert. Die Versuchspersonen konnten die Videos beliebig oft abspielen. Die Teilnehmenden erhielten die Instruktion, sich vorzustellen, der Fahrer des Folgefahrzeugs zu

sein. Darüber hinaus war es ihre Aufgabe, für jedes Video auf einer sechs-stufigen Likert-Skala von „trifft nicht zu“ (1) bis „trifft zu“ (6) zu bewerten, inwieweit die sechs manipulierten Kriterien auf die gezeigte Fahrleistung zutrafen. Zur Überprüfung, ob die Versuchspersonen subjektiv Unterschiede im Überholmanöver zwischen den zwei Videos wahrgenommen haben, wurde „kritischer Überholvorgang“ als zusätzliches zu bewertendes Kriterium aufgenommen. Die Videosequenzen und die sieben Kriterien wurden den Teilnehmenden in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Der Fragebogen wurde über persönlichen Kontakt verteilt. $N = 16$ Personen ($n = 7$ weiblich) nahmen an der Studie teil. Im Mittel waren sie $M = 28$ Jahre alt ($SD = 6$) und hatten eine durchschnittliche Fahrerfahrung von $M = 10$ Jahren ($SD = 6$). 44 % der Stichprobe waren in der Automobilbranche tätig. Die Versuchspersonen erhielten keine Incentivierung.

5.3.3.2. Ergebnisse. Zum Vergleich der subjektiven Bewertungen der guten und der schlechten Fahrleistung wurde für jedes der sieben Kriterien ein gepaarter t-Test (Bonferroni-korrigiert) durchgeführt. Tabelle 11 beinhaltet die deskriptiven Statistiken beider Videos sowie die inferenzstatistischen Ergebnisse. Die Analysen zeigten signifikante Unterschiede für alle Vergleiche. Des Weiteren gaben die Teilnehmenden für alle sechs Kriterien schlechter Fahrleistung an, dass diese auf das Video der schlechten Fahrleistung zutreffen (alle $M > 5$), während dies nicht der Fall für das Video mit der guten Fahrleistung war (alle $M < 2$). Diese Ergebnisse implizieren, dass die Manipulation innerhalb der Videosequenzen erfolgreich war. D. h., es gibt signifikante Unterschiede zwischen den Videos und eines der Videos stellt eine gute, das andere eine schlechte Fahrleistung gemäß den zuvor gemachten Definitionen dar. Aus diesem Grund kann geschlossen werden, dass das Videomaterial für die nachfolgenden Schritte der Itemauswahl und der Untersuchung der Faktorenstruktur (s. Abbildung 18) genutzt werden kann.

Tabelle 11

Deskriptiv- und Inferenzstatistik des Manipulationschecks des Videomaterials der Studie 2

Kriterium	Deskriptive Statistik		T-Test
	Gute Fahrleistung	Schlechte Fahrleistung	
Starke Beschleunigung	$M = 1.25 (SD = .58)$	$M = 5.25 (SD = .45)$	$t(15) = -25.30, p \leq .001,$ $d = -6.33$
Geringer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	$M = 1.13 (SD = .34)$	$M = 5.06 (SD = .93)$	$t(15) = -16.96, p \leq .001,$ $d = -4.24$
Häufige Wechsel zwischen Bremsen und Beschleunigen	$M = 1.00 (SD = .00)$	$M = 5.31 (SD = .48)$	$t(15) = -36.03, p \leq .001,$ $d = -9.01$
Ruckartige Lenkbewegungen	$M = 1.06 (SD = .25)$	$M = 5.25 (SD = .58)$	$t(15) = -30.80, p \leq .001,$ $d = -7.70$
Pendeln in Spur/Schlangenlinien	$M = 1.06 (SD = .25)$	$M = 5.31 (SD = .48)$	$t(15) = -29.45, p \leq .001,$ $d = -7.36$
Überfahren der Seitenlinie	$M = 1.13 (SD = .50)$	$M = 5.38 (SD = .50)$	$t(15) = -29.45, p \leq .001,$ $d = -7.36$
Kritischer Überholvorgang	$M = 1.06 (SD = .25)$	$M = 2.56 (SD = 1.86)$	$t(15) = -3.35, p \leq .005,$ $d = -0.84$

5.4. Finale Itemauswahl und Untersuchung der Faktorenstruktur

Ausgestattet mit der Sammlung möglicher Attribute (Kapitel 5.2) und dem Videomaterial (Kapitel 5.3), war eines der Hauptziele der Studie 2 – die Auswahl trennscharfer Items und die Untersuchung der Faktorenstruktur des Konzepts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung (s. H1) – möglich. Zur Erreichung dieses Ziels wurde eine Online-Studie durchgeführt. In dieser Studie sahen die Teilnehmenden das in Kapitel 5.3 generierte Videomaterial und bewerteten es anhand der in Kapitel 5.2 gesammelten Attribute. Die aus dieser Studie resultierenden Daten wurden mit Diskriminanzanalysen und einer explorativen Faktorenanalyse untersucht. Im Folgenden sind die Methode und Ergebnisse dieser Online-Studie berichtet.

5.4.1. Methode. Erneut lief die Umfrage über das Online-Tool Survey Monkey® (Finley & Finley, 2015). Sie wurde auf verschiedenen Online-Plattformen und sozialen Netzwerken veröffentlicht. Auf zwei aufeinanderfolgenden Seiten wurden die beiden Videosequenzen (s. Kapitel 5.3) dargestellt. Die Teilnehmenden der Umfrage konnten sie beliebig oft abspielen. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, sich vorzustellen, der Fahrer des Folgefahrzeugs zu sein. In direkter Folge zu jeder Videodarbie-

tung bewerteten die Teilnehmenden die gezeigte Fahrleistung anhand der in Kapitel 5.2 ausgewählten 115 Attribute über eine sechs-stufige Likert-Skala von „trifft nicht zu“ (1) bis „trifft zu“ (6). Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten, wurden die Videos und Attribute in einer randomisierten Reihenfolge gezeigt. Insgesamt nahmen $N = 213$ Personen an dieser Online-Studie teil. $N = 110$ ($n = 43$ weiblich) Teilnehmende beendeten sie und wurden deshalb in die Analysen mit aufgenommen. Das Durchschnittsalter dieser finalen Stichprobe betrug $M = 29$ Jahre ($SD = 10$). Die mittlere Fahrerfahrung lag bei $M = 11$ Jahren ($SD = 10$). Die Versuchspersonen erhielten keine Incentivierung.

5.4.2. Ergebnisse. Die erste Untersuchung betraf die Frage, ob die 115 Attribute die in den beiden Videos gezeigten Fahrleistungen unterscheiden konnten und welche der Attribute am meisten zu dieser angenommenen Unterscheidung beitrugen. Die Attribute, die den höchsten erklärenden Wert boten, wurden als die relevanten Elemente des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung bestimmt.

Zu diesem Zweck wurde eine Diskriminanzanalyse durchgeführt. Sie ergab hoch zufriedenstellende Kennwerte mit einer kanonischen Korrelation von $c = .96$ und einem signifikanten Wilk's Lambda von $\Lambda = .07$ ($p \leq .001$). Diese Werte deuten auf eine gute Unterscheidbarkeit zwischen den zwei Fahrleistungen mittels der 115 Attribute hin.

Anschließend wurde zur Auswahl der Attribute, die die höchste Trennschärfe besitzen, pro Attribut der standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizient untersucht. Die Attribute, deren Koeffizient größer als $|.3|$ waren, wurden als trennscharf klassifiziert. Von den 115 Attributen erfüllten 22 dieses Kriterium und wurden als Items des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung extrahiert (s. Tabelle 12).

Tabelle 12

Extrahierte Items zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung inklusive dem standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten sowie den Faktorladungen der explorativen Faktorenanalyse in Studie 2

Item	Standardisierter kanonischer Diskriminanzfunktionskoeffizient	Faktorladung
gefährlich	-.376	-.950
sicher	-.400	.932
diszipliniert	-.479	.923
katastrophal	.478	-.906
kritisch	-.342	-.842
riskant	.322	-.944
kontrolliert	.460	.899
aufregend	.605	-.549
irritierend	-.477	-.869
konstant	.365	.895
ruhig	-.652	.900
gleichmäßig	-.458	.918
zufriedenstellend	-.845	.961
grenzwertig	.458	-.940
präzise	.381	.857
akzeptabel	.391	.938
überzeugend	.444	.879
gut aufgehoben	.585	.935
vorbildlich	.494	.948
stressig	.438	-.897
rücksichtsvoll	.724	.927
fahrlässig	.645	-.916

Aufgrund der reduzierten Anzahl von Attributen auf 22 wurde eine weitere Diskriminanzanalyse durchgeführt, in der überprüft wurde, ob die grundlegenden statistischen Kennwerte auch bei der reduzierten Attributzahl immer noch eine ausreichende Unterscheidung zwischen den zwei Fahrleistung anzeigen. Diese zweite Analyse ergab eine kanonische Korrelation von $c = .93$ und ein signifikantes Wilk's Lambda von $\Lambda = .14$ ($p \leq .001$). Diese Ergebnisse weisen erneut auf eine ausreichende Unterscheidung zwischen den beiden Fahrleistungen hin. Folglich ist die reduzierte Sammlung von

22 Items zur Beschreibung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung verwendbar.

Zur Untersuchung der faktoriellen Struktur des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung wurde anschließend eine explorative Faktorenanalyse mit den zuvor ausgewählten 22 Items durchgeführt. Das Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium hatte einen Wert von .98, was auf eine hohe Stichprobeneignung hindeutet. Der Bartlett-Test für Sphärizität war signifikant, $X^2(231) = 7997.42, p \leq .001$. Eine Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation resultierte in einem Faktor, der 81.8 % der Gesamtvarianz erklärte. Tabelle 12 beinhaltet die Faktorladungen für jedes Item.

Zur Untersuchung der internen Konsistenz der resultierenden Skala wurde eine Reliabilitätsanalyse durchgeführt. Hierzu wurden alle Items mit einer negativen Faktorladung (s. Tabelle 12) umkodiert. D. h., einem ursprünglichen Itemwert von 1 wurde der neue Wert von 6 zugewiesen, 2 wurde zu 5 geändert usw. Auf diese Weise wurde eine subjektiv angemessene Fahrleistung mit einem hohen Itemwert verknüpft. Die Reliabilitätsanalyse über die 22 Items des identifizierten Faktors ergab ein Cronbach's Alpha von $\alpha = .99$. Alle Items hatten eine korrigierte Item-Skala-Korrelation von mehr als $r = .53$. Dies weist darauf hin, dass alle Items eine ausreichend hohe Trennschärfe besitzen und dass keines der Items von der Skala ausgeschlossen werden muss.

5.5. Ableitung einer Messmethodik

Der vorherige Schritt führte zu einem einfaktoriellen Konzept zur Definition des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Zur Erfassung dieses Konstrukts ist es notwendig, eine Messmethodik abzuleiten (s. H2). Hierzu wurden die 22 Adjektive des Konstrukts als Items eines Fragebogens verwendet. Gemäß dem in Kapitel 5.4.1 verwendeten Fragenformat erscheint eine sechs-stufige Likert-Skala von „trifft nicht zu“ (1) bis „trifft zu“ (6) als geeignetes Skalenformat.

Für die Auswertung und Interpretation des Fragebogens müssen alle Items mit einer negativen Faktorladung (s. Tabelle 12) wie in Kapitel 5.4.2 umkodiert werden. Danach kann die folgende Formel (1) dazu genutzt werden, einen Gesamtskalenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zu berechnen.

$$\left(\sum_{i=1}^{22} Item_i \right) - 22 / 1.1 \quad (1)$$

Mittels dieser Formel werden zuerst die Werte aller 22 Items ($Item_i$) addiert. Auf eine Gewichtung der Items wird verzichtet, da alle Items eine ungefähr ähnliche Faktorladung aufweisen (s. Tabelle 12). Diese Addition resultiert in einem möglichen Wertebereich zwischen 22 und 132. Um einen besser interpretierbaren Wertebereich von 0 bis 100 zu erhalten, müssen anschließend zwei zusätzliche Berechnungen durchgeführt werden: Zum einen wird die Gesamtanzahl aller Items, d. h. 22, von der Summe subtrahiert. Zum anderen muss der resultierende Wert durch 1.1 dividiert werden. Nach Anwendung dieser Prozedur beschreiben Werte nahe 0 eine schlechte oder kritische Fahrleistung. Werte nahe 100 deuten auf eine akzeptable oder gute Fahrleistung hin.

5.6. Diskussion

Die Studie 2 der vorliegenden Dissertation fokussierte sich auf die subjektive Fahrleistungsbewertung als zentrale Komponente des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015, Voß & Schwalm, 2015). Es wurde die Fragestellung untersucht, wie die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, die sowohl Längs- als auch die Querregelung umfasst, konzeptualisiert und messbar gemacht werden kann. Im folgenden Kapitel sollen die von dieser Fragestellung abgeleiteten Hypothesen beantwortet und die Ergebnisse inhaltlich und methodisch diskutiert werden.

Eine erste von der Fragestellung abgeleitete Hypothese war die folgende H1:

H1: Die Idee der subjektiven Fahrleistungsbewertung, die sowohl die Längs- als auch die Querregelung umfasst, lässt sich über das Faktorenkonstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung sowie zugehörigere Attribute erfassen.

Die implementierte, vierstufige Methodenabfolge von Literaturrecherchen, Online-Studien, Card-Sortings und inferenzstatistischen Verfahren (Diskriminanz- und Faktorenanalysen) erlaubte die Untersuchung des Faktorenkonstrukts der subjektiven Fahrleistungsbewertung hinsichtlich Längs- und Querregelung. Es ergab sich eine einfaktorielle Lösung mit 22 Attributen (s. Tabelle 12), welche zusammen über 80 % der Gesamtvarianz erklären konnten. Die Güte dieses Ergebnisses konnte u. a. über eine Reliabilitätsanalyse bestätigt werden. Folglich kann die Hypothese H1 vollständig angenommen werden.

Ausgehend hiervon wurde im Rahmen der Studie 2 als weitere Hypothese die folgende H2 untersucht:

H2: Ausgehend vom Faktorenkonstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung lässt sich eine Messmethodik zur Erfassung der ganzheitlichen subjektiven Fahrleistungsbewertung ableiten.

Die erarbeitete Faktorenstruktur ermöglichte es, im Rahmen der Studie 2 eine Fragebogenmethodik zur Erfassung der subjektiven Fahrleistungsbewertung abzuleiten. Diese umfasste sowohl die Items des Fragebogens, das Skalenformat als auch eine Auswertungslogik. Insofern kann auch die Hypothese H2 angenommen werden.

Beim Vergleich der in dieser Studie erlangten Ergebnisse mit den in Kapitel 2.5.1 vorgestellten bestehenden Arbeiten in diesem Themenfeld, fällt ein zentraler Unterschied schnell ins Auge. Die in der Literaturübersicht aufgenommenen Arbeiten postulierten durchweg ein zwei- oder mehrfaktorielles Konstrukt zur Definition der subjektiven Fahrleistungswahrnehmung bzw. -bewertung (z. B. Dick 2001, 2002; Eberl, 2014; Engelbrecht et al., 2009). Bei genauerer Betrachtung dieser Ansätze ist feststellbar, dass sich die im Rahmen der Arbeiten identifizierten Faktoren unter den zwei Clustern des Komforts und der Sicherheit subsumieren lassen (s. Tabelle 13). Als solches liegt die Frage nahe, warum sich in der aktuellen Studie diese zwei scheinbar zentralen Kategorien nicht in der identifizierten Faktorenstruktur widerspiegeln. Zur Beantwortung dieser Frage erscheint die tiefergehende Betrachtung der 22 Attribute des Konstrukts der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung sinnvoll. Diese Betrachtung offenbart, dass sich die 22 identifizierten Attribute zumindest auf einer deskriptiven Ebene den zwei semantischen Kategorien des Komforts und der Sicherheit zuordnen lassen. Als solches können die Items „aufregend“, „irritierend“, „konstant“, „ruhig“, „gleichmäßig“, „zufriedenstellend“, „akzeptabel“, „überzeugend“, „gut aufgehoben“ und „stressig“ der semantischen Kategorie Komfort zugeordnet werden. Die Items „gefährlich“, „sicher“, „diszipliniert“, „katastrophal“, „kritisch“, „riskant“, „kontrolliert“, „grenzwertig“, „präzise“, „vorbildlich“, „rücksichtsvoll“ und „fahrlässig“ hingegen könnten in der Kategorie Sicherheit zusammengefasst werden. Dadurch, dass diese zwei semantischen Kategorien gemäß den aktuellen Studienergebnissen in einem Faktor kombiniert sind, ist eine mögliche Schlussfolgerung, dass das Konstrukt einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung als Teil des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) zwei Dimensionen beinhaltet. Diese sind verbal zwar

trennbar, hängen in der der Bewertung selbst aber stark zusammen und können nicht unabhängig voneinander bewertet werden. Anders ausgedrückt werden Fahrerinnen und Fahrer eine Fahrleistung, die sie als unsicher einschätzen, nicht als komfortabel bewerten und umgekehrt. Zur finalen Absicherung dieser Aussage bedarf es allerdings in Zukunft weiterer empirischer Forschung.

Tabelle 13

Zuordnung bestehender Faktorenkonstrukte der subjektiven Fahrleistungsbewertung zu den semantischen Kategorien „Komfort & Gefallen“ sowie „Sicherheit & Kontrolle“

Bestehende Arbeiten	Komfort & Gefallen	Sicherheit & Kontrolle
Dick (2001, 2002)	Entspannung, Anregung	Störung, Routine, Kontinuität
Eberl (2014)	Komfort, Diskomfort	Sicherheit
Engelbrecht et al. (2009)	Fahrspaß, Fahrspaßmangel, Komfort, Diskomfort	
Grzesik (2009)	Komfort, Akzeptanz	Zurechtkommen, Kontrollierbarkeit, Sicherheit
Popiv (2012)	Unterstützung, Gefallen, Komfort	Sicherheit, Bevormundung
Tischler und Renner (2007)	Komfort	Rückmeldung, Handlungsfreiheit, Kontrollierbarkeit
Toda und Kageyama (2007)	Fahrspaß	Kontrollierbarkeit
Vilimek et al. (2012)	Gefallen	Sicherheit
Winner (2012)	Komfort	Sicherheit, Erwartungskonformität
Zimmer (1997)	Angstauslösung	Kontrollierbarkeit

Anmerkung. Nicht relevante Faktoren (z. B. Energieeffizienz, Vilimek et al., 2012) wurden in dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt.

Neben dieser rein inhaltlichen Diskussion der Ergebnisse müssen auch einige methodische Aspekte reflektiert werden. So bietet die vorliegende Studie 2 die Möglichkeit der Ableitung einer Messmethodik, deren zugrunde liegendes Faktorenkonstrukt bereits einer Reliabilitätsprüfung unterzogen wurde. Allerdings erscheint die weitere Validierung des entwickelten Fragebogens zwingend erforderlich. Es ist u. a. zu klären, an welchem Skalenwert des Fragebogens der Grenzwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zu lokalisieren ist. Ein weiterer Aspekt bezieht sich auf die Studienmethodik und hier spezifisch auf die Verwendung simulierter Fahrsequenzen im Rahmen der Online-Studie zur Attributsgenerierung (s. Kapitel 5.2.2). Zu diskutieren sind die Übertragbarkeit der simulierten Videosequenzen auf die Realität,

die Darbietung von Fahrleistungen als Videos in einer Online-Studie sowie die hieraus potenziell entstehenden Wahrnehmungsbeeinflussungen. Da der Fokus der Online-Studie vor allem aber auf dem (semantischen) Vergleich der gezeigten Fahrleistungen lag, sind die möglichen generellen Effekte der verwendeten Methodik eher zu vernachlässigen. Trotzdem wurde diesen Punkten in der zweiten Datenerhebung der aktuellen Studie 2 zur Itemauswahl und Untersuchung der Faktorenstruktur (s. Kapitel 5.4) bereits Rechnung getragen. So wurde im Rahmen einer Realfahrt Videomaterial aufgezeichnet.

Zusammenfassend lieferte die Studie 2 einen wertvollen Beitrag zum näheren Verständnis der dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) zugrundeliegenden Komponenten bzw. Mechanismen der funktionalen Verhaltensanpassungen. Es konnten wichtige Schlussfolgerungen im zweiten offenen Forschungsfeld (s. Kapitel 3.1.2), der subjektiven Fahrleistungsbewertung, gezogen und Antworten auf die Fragestellung der Studie 2 (Konzeptualisierung und Messung der subjektiven Fahrleistungsbewertung) gefunden werden. Die subjektive Fahrleistungsbewertung scheint auf den zwei semantischen Kategorien des Komforts und der Sicherheit zu beruhen, die in einem einfaktoriellen Konzept eng miteinander verknüpft sind und die über eine Messmethodik (Fragebogen) reliabel erhoben werden können. Dieses Wissen wurde in den Folgestudien der vorliegenden Dissertation genutzt, um die weiteren, in Kapitel 3.2 aufgestellten Fragestellungen zu untersuchen. Zum einen wurden in Studie 3 und 4 die von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten subjektiven Zielwerte in der Fahrleistung näher untersucht. Unter Verwendung des entwickelten Fragebogens und weiterer zusätzlicher Bewertungsskalen wurden Schwellenwerte subjektiv akzeptierter Trajektorienbereiche definiert. Zum anderen wurden in den Studien 5 und 6 die subjektive Fahrleistungsbewertung und die Einschätzung des wahrgenommenen Komforts bzw. der Sicherheit als Auslöser funktionaler Verhaltensanpassungen geprüft.

6. Studie 3 – Bestimmung von Schwellenwerten einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes mit Fokus auf das automatisierte Fahren

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0614/2014 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0614/2014.

The author is solely responsible for the content.

6.1. Zielsetzung und Hypothese

Wie auch Studie 2 beschäftigte sich die Studie 3 der vorliegenden Dissertation mit der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Während die vorherige Studie sich allerdings mit der faktorenanalytischen Konzeptualisierung des Konstrukts und der Entwicklung einer Messmethodik beschäftigte, lag der Fokus der Studie 3 auf den Zielwerten der Fahrleistung (s. Kapitel 3.2.3 und Abbildung 8, rote Hervorhebung). Diese scheinen gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) relevante Auslöser der funktionalen Verhaltensanpassungen zu sein. Da in der bestehenden Literatur die Fahrleistungszielwerte, wenn überhaupt zumeist für die Längsführung untersucht wurden und es noch offen ist, welche Faktoren Einfluss auf die subjektive Fahrleistungsbewertung haben (s. Kapitel 3.1), untersuchte die aktuelle Studie die Fragestellung, welche Trajektorienbereiche in der Querregelung in Abhängigkeit spezifischer Personen- und Situationsfaktoren als subjektiv angemessen bewertet werden. Vor dem Hintergrund des automatisierten Fahrens wurde ein erster Bezug der erlangten Ergebnisse zu diesem Themenfeld hergestellt. Die empirische Untersuchung der Fragestellung wurde von der Autorin der vorliegenden Dissertation im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2017) und war unter Anleitung der Autorin Gegenstand der unveröffentlichten studentischen Arbeit von Keck (2016). Die Inhalte der Studie wurden als Teil der Dissertation bereits

durch die Autorin vorveröffentlicht (Voß et al., 2018). Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nur ein kurzer Überblick über die wichtigsten Inhalte der Studie gegeben.

In ähnlicher Weise zu den anderen beiden Studien wurde auch hier die Fragestellung der Studie in Form einer Hypothese konkretisiert. Ausgehend von den bestehenden Vorarbeiten, die bereits Bereiche akzeptierter Trajektorien annahmen (s. Kapitel 2.5.2, z. B. Bärghman et al., 2015; Papakostopoulos et al., 2017), und den Überlegungen potenzieller Einflussfaktoren (s. Kapitel 2.5.3) ergab sich die folgende Hypothese H1:

H1: Der Bereich einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes kann nach links (d. h. in Richtung der Straßenmitte) mittels eines Schwellenwerts begrenzt werden. Dieser Schwellenwert variiert in Abhängigkeit der folgenden Variablen: Er wird durch hohe Fahrerfahrung und ein hohes Sensation Seeking erhöht. Er wird durch die Anwesenheit von Gegenverkehr, dessen Position nahe der Straßenmitte und Regen verringert.

Im Folgenden sind die Methode sowie die Ergebnisse zusammengefasst (Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3). Eine anschließende Diskussion (Kapitel 6.4) dient der Hypothesenbeantwortung und kritischen Reflexion sowie der Einordnung der Ergebnisse in den Rahmen der Dissertation.

6.2. Methode

Zur Beantwortung der Hypothese wurde im Rahmen der Studie 3 im Februar 2016 eine Online-Studie mit $N=250$ Versuchspersonen ($N=161$ vollständige Datensätze) durchgeführt. Die Versuchspersonen sahen Videosequenzen, in denen Fahrten aus der Ego-Perspektive ohne Sichtbarkeit von Fahrzeugkomponenten, d. h. ohne einen Referenzpunkt, dargestellt wurden. Wie in Studie 2 erörtert (s. Kapitel 5.2.2.1), wurden durch diese Tatsache allerdings keine Verzerrungen der subjektiven Fahrleistungsbeurteilung erwartet. Die Teilnehmenden wurden gebeten, sich vorzustellen, selbst am Steuer des Fahrzeugs zu sitzen. Anschließend war es ihre Aufgabe, diese Videosequenzen subjektiv hinsichtlich der Angemessenheit der Fahrleistung und mittels des in Studie 2 entwickelten Fragebogens (s. Kapitel 5.5) zu bewerten. Insofern ähnelte das gewählte Vorgehen dem der in Kapitel 2.5 diskutierten Studien zur Schwellenwertbestimmung in der Längsführung (Siebert et al., 2014; 2017). Wie auch in Studie 2 wurde das im Rahmen der Dissertation entwickelte Java-Tool zur Generierung der Videos ge-

nutzt (s. Kapitel 5.2.2.1). Das allgemeine Fahrscenario stellte eine leicht kurvige, zweispurige Landstraße dar (Fahrstreifenbreite jeweils 3.50 m). Es wurden das Wetter (Sonne/Regen) sowie der Gegenverkehr (kein Gegenverkehr/Gegenverkehr mit einem Abstand von 0.0 m/0.5 m/1.0 m von der Fahrstreifenmitte) manipuliert. Aus den möglichen Kombinationen dieser Faktoren wurden sechs Variationen ausgewählt, von denen jede Versuchsperson jeweils eine Variante erlebte. Innerhalb jeder Variation wurde darüber hinaus der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs nach links von 0.2-0.8 m in Schritten von 0.1 m manipuliert, wobei das Ego-Fahrzeug stets auf dem eigenen Fahrstreifen verblieb und in keiner der Variationen ein objektives Kollisionsrisiko zwischen Gegenverkehr und Ego-Fahrzeug bestand. Als solches erlebte jede Versuchsperson sieben Videosequenzen in randomisierter Reihenfolge. Neben den Situationsfaktoren wurden die Stichprobe weiterhin hinsichtlich der zwei Personenfaktoren Fahrerfahrung (niedrig/hoch) und Sensation Seeking (niedrig/hoch) klassifiziert.

6.3. Ergebnisse

Die Datenauswertung der Online-Studie fand auf deskriptiver und inferenzstatistischer Basis statt. Im Rahmen der inferenzstatistischen Auswertungen wurden verschiedene binäre logistische Regressionen für die AV der Angemessenheitsbewertung berechnet. Diese Analysen zeigten, dass sich tatsächlich Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes feststellen ließen und diese stark in Abhängigkeit der Personen- und Situationsfaktoren variierten. So lag der Schwellenwert je nach Faktorenkombination zwischen 0.4 und 0.9 m Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs. Die Ergebnisse zeigten, dass die subjektive Fahrleistungsbeurteilung insbesondere von der Position des Gegenverkehrs abhing. Ein höherer Versatz des Gegenverkehrs in Richtung der Straßenmitte führte zu einem geringeren Wert eines subjektiv akzeptierten Lateralversatzes. Fahrerinnen und Fahrer schienen eine Art Sicherheitsabstand zwischen sich und dem Gegenverkehr zu bewahren. Das Wetter (Regen) und die Personenfaktoren (Sensation Seeking) spielten nur in spezifischen Fällen, in denen mehr der Komfort als die Sicherheit im Vordergrund standen (z. B. bei Gegenverkehr ohne Lateralversatz), eine Rolle. Die zusätzliche Analyse des in Studie 2 entwickelten Fragebogens zeigte weiterhin, dass der Skalenwert des Instruments am Schwellenwert eines subjektiv angemessen empfundenen Lateralversatzes zwischen 51 und 59 Punkten zu liegen scheint.

6.4. Diskussion

In Fortführung der Studie 2 beschäftigte sich auch die Studie 3 mit der empirischen Ausarbeitung der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015). Ausgehend von der Fragestellung, welche Trajektorienbereiche in der Querregelung in Abhängigkeit spezifischer Personen- und Situationsfaktoren als subjektiv angemessen bewertet werden, wurde die folgende Hypothese H1 untersucht:

H1: Der Bereich einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes kann nach links (d. h. in Richtung der Straßenmitte) mittels eines Schwellenwerts begrenzt werden. Dieser Schwellenwert variiert in Abhängigkeit der folgenden Variablen: Er wird durch hohe Fahrerfahrung und ein hohes Sensation Seeking erhöht. Er wird durch die Anwesenheit von Gegenverkehr, dessen Position nahe der Straßenmitte und Regen verringert.

Die hierzu durchgeführte Online-Studie bestätigt die zentrale Hypothese H1 nur teilweise. Zwar ließen sich Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes lokalisieren (zwischen 0.4 und 0.9 m Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs), der Einfluss der Personen- und Situationsfaktoren stellte sich jedoch komplexer dar als angenommen. Während vor allem der Gegenverkehr (und hier dessen Abstand von der Straßenmitte) eine Rolle für die Ausprägung der Schwellenwerte zu spielen schien, hatten Regen und das Sensation Seeking nur in Fällen Einfluss, in denen der Komfort eine größere Rolle spielte als die Sicherheit. Die Fahrerfahrung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Lokalisation der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes. Insofern stellen die Ergebnisse der aktuellen Studie eine wichtige Erweiterung der bestehenden, in Kapitel 2.5.2 und 2.5.3 diskutierten Literatur hinsichtlich subjektiver Fahrleistungsschwellen und möglicher Einflussfaktoren auf diese dar. Die bisherigen Arbeiten, die Schwellenwerte vor allem für die Längsführung bestimmten (z. B. Siebert et al., 2014; 2017), konnten um die Querführung ergänzt werden. Darüber hinaus konnte der vorgenommene Transfer möglicher Einflussfaktoren aus der Unfallforschung auf die subjektiven Fahrleistungsschwellen empirisch verifiziert werden.

Hinsichtlich des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) bedeuten die gewonnenen Erkenntnisse, dass die zentrale Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung vor allem situationsabhängig zu sein scheint und hier-

bei vor allem der Gegenverkehr bzw. dessen Fahrverhalten eine Rolle spielt. Weiterhin scheinen Fahrerinnen und Fahrer maximal Lateralversätze von 0.4 -0.9 m nach links zu akzeptieren. Trajektorien mit einem höheren Lateralversatz könnten gemäß den Annahmen des Arbeitsmodells situationsabhängig vonseiten des supervisory controllers zu einer Diskrepanz mit den Zielwerten führen und kompensative Handlungen auslösen. Dabei scheint es eine Unterscheidung zwischen den subjektiven Schwellenwerten und der objektiven bzw. technischen Sicherheit zu geben. Alle subjektiven Schwellenwerte der aktuellen Studie lagen in einem Trajektorienbereich ohne Kollisionsrisiko mit dem Gegenverkehr. Dieses Ergebnis hebt in Übereinstimmung mit Bellem et al. (2017), Michon (1985) und Werling (2011) (s. Kapitel 2.5.2) neben der technischen Perspektive die Wichtigkeit der psychologischen Betrachtung im Themenfeld der Fahrleistungszielwerte hervor.

Vor dem Hintergrund der Entwicklungen des automatisierten Fahrens erscheint es schlüssig, diese Erkenntnisse zur subjektiven Fahrleistungsbewertung bzw. zu den Schwellenwerten auch in diesem Kontext zu diskutieren. Da es scheinbar Schwellenwerte subjektiv angemessen empfundener Fahrleistungen hinsichtlich des Lateralversatzes gibt, ist es denkbar, dass diese nicht nur im manuellen, sondern auch im automatisierten Fahren gibt. Diese sollten zur Gewährleistung der Nutzerakzeptanz grundsätzlich im Rahmen einer automatisierten Fahrt nicht überschritten werden. Weiterhin sollte auch die Situationsabhängigkeit der subjektiven Fahrleistungsbewertung bei der Trajektorienplanung automatisierter Fahrfunktionen berücksichtigt werden. Es erscheint sinnvoll, adaptive Mechanismen bereitzustellen, die die automatisierte Trajektorie an die aktuellen bzw. erwarteten Situationsfaktoren (insbesondere an den Gegenverkehr) anpassen. Über diese Flexibilität in der Systemauslegung könnte das Fahrzeug über den gesamten Fahrtverlauf in einem subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistungsbereich, der den Zielwerten des supervisory controllers entspräche, gehalten werden. Insofern scheint der kooperative Charakter automatisierter Fahrzeuge, wie auch von Rudack, Meincke, Jobmann und Lott (2003) diskutiert, von zentraler Natur zu sein. Zur Illustration dieser Idee kann ein Beispiel herangezogen werden. Ein Fahrzeug fährt automatisiert auf einer Landstraße. Ihm begegnet ein entgegenkommendes Fahrzeug, welches aufgrund eines Hindernisses (z. B. eines Fahrrads) in Richtung der Straßenmitte ausweichen muss. Das automatisierte Fahrzeug sollte dieses Verhalten des Gegenverkehrs detektieren, die Trajektorienplanung anpassen und nach rechts ausweichen. Über diese

Maßnahme ließe sich eine erhöhte Systemakzeptanz aufseiten der Insassinnen und Insassen des automatisierten Fahrzeugs erzeugen. Erstens würde der fahrerseitige Komfort auch in kritischeren Fahrsituation beibehalten. Zweitens könnten mögliche, von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierte funktionale Verhaltensanpassungen aufgrund von Diskrepanzen zwischen der aktuellen Fahrleistung und den Zielwerten vermieden werden.

Neben dieser Diskussion der Ziel- bzw. Schwellenwerte in der subjektiven Fahrleistungsbewertung und deren möglicher Rolle im automatisierten Fahren lassen sich auch Schlussfolgerungen zum in Studie 2 entwickelten Fragebogen ziehen. Im Rahmen der methodischen Diskussion dieser vorherigen Studie wurde die weitere Überprüfung des entwickelten Messinstruments gefordert (s. Kapitel 5.6). Dies bezog sich insbesondere auf die Identifikation eines Skalenwerts bzw. eines Skalenbereichs, der Hinweise auf die Lokalisation der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zuließe. Da in der Online-Studie der Studie 3 der Skalenwert des Instruments am identifizierten Schwellenwert zwischen 51 und 59 Punkten lag, erscheint es im Rückschluss sinnvoll, diesen Bereich in zukünftigen Erhebungen als Grenze zwischen subjektiv angemessenen und nicht angemessenen Trajektorien zu sehen. Allerdings kann die Definition dieses Wertebereichs nur als ein erster Schritt in der Skalenvalidierung gesehen werden. Weitere Studien mit einem vergleichbaren Forschungsgegenstand (z. B. gleiche Methodik in anderen Szenarien) sind in jedem Fall erforderlich.

Insgesamt bietet die Studie 3 also eine gute Möglichkeit, Wissen zu den Zielwerten der subjektiven Fahrleistungsbewertung im Rahmen der Zielsetzung der vorliegenden Dissertation zu generieren. Im Zuge einer kritischen Reflexion der Online-Studie lassen sich jedoch auch einige Nachteile identifizieren. Zwar wurde ein Bezug zwischen den Ergebnissen und den Entwicklungen des automatisierten Fahrens hergestellt, jedoch bezog sich die Instruktion der Studie nicht klar auf das automatisierte Fahren („selber am Steuer“). Weiterhin könnten die Darbietung von Fahrleistungen als Videos in einer Online-Studie sowie die randomisierte Darstellung der Videosequenzen es schwierig für die Versuchspersonen gemacht haben, die verschiedenen Videosequenzen voneinander zu unterscheiden. Als solches ist die Validität der genutzten Methodik (Videodarbietung im Rahmen einer Online-Studie) zu überprüfen. Eine vergleichende Erfassung der Schwellenwerte in einer realitätsnäheren Fahrsimulation oder in einem Teststreckenversuch erscheinen als sinnvolle Optionen. Neben diesen rein methodi-

schen Faktoren ist ein weiterer inhaltlicher Aspekt zu diskutieren. Insgesamt kann die vorliegende Studie nur ersten Aufschluss über die Lokalisierung eines Zielwerts in der Fahrleistung in Abhängigkeit verschiedener Personen- und Situationsfaktoren geben. Neben den untersuchten Faktoren erscheint es jedoch wahrscheinlich, dass es weitere Faktoren gibt, die die subjektive Fahrleistungsbewertung beeinflussen könnten. All diesen Herausforderungen soll in den folgenden Studien Rechnung getragen werden. Sie bauen auf den Erkenntnissen der Studie 3 auf und führen die Untersuchung der subjektiven Fahrleistungsschwellen fort.

7. Studie 4 – Untersuchung des situativen Einflusses auf die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0685/2016 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0685/2016.

The author is solely responsible for the content.

7.1. Zielsetzung und Hypothese

Studie 3, die von Voß et al. (2018) bereits publiziert wurde, lieferte erste wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Lokalisation der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes. In Fortführung zu dieser Studie untersuchte auch Studie 4 diese Komponente des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) (s. Kapitel 3.2.4 und Abbildung 8, rote Hervorhebung). Diese empirische Untersuchung wurde von der Autorin der vorliegenden Dissertation im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2019).

Während in Studie 3 ein erster Bezug der subjektiven Fahrleistungszielwerte zum automatisierten Fahren hergestellt wurde, wurden unter Beibehaltung der grundlegenden Methodik (Online-Studie mit Videodarbietung) in der aktuellen Studie 4 diese Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen für das automatisierte Fahren bestimmt (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Ein Diskussionspunkt von Studie 3 war, dass es neben den bereits untersuchten Einflussfaktoren weitere Faktoren gibt, die die subjektive Fahrleistungsbewertung beeinflussen können. Ausgehend von der in Kapitel 2.5 diskutierten Literatur (z. B. Rosey et al., 2009) und gemäß Studie 3, in der vor allem Situationsfaktoren (z. B. Gegenverkehr) einen Einfluss zu haben scheinen, wurde in Studie 4 die Fragestellung untersucht, welche Lokalisation

die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes im automatisierten Fahren in Abhängigkeit spezifischer Situationsfaktoren besitzen. Da, wie erwähnt, insbesondere der Gegenverkehr einen signifikanten Einflussfaktor darzustellen scheint, wurde entschieden, diesbezügliche Aspekte, nämlich die Fahrzeugklasse und den Abstand von der Straßenmitte, zu untersuchen. Weiterhin scheint es so zu sein, dass sich die fahrerseitige Wahrnehmung der Umgebung (d. h. auch des Gegenverkehrs) je nach Geschwindigkeit unterscheidet (Kayser & Heß, 1990; Kayser, Sanders, Heß, Spijkers & Bartmann, 1989). Deshalb wurde die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs als dritter Faktor in die Studie 4 aufgenommen. Ausgehend von diesen Überlegungen ergab sich die Hypothese H1:

H1: Der Bereich einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes kann nach links (d. h. in Richtung der Straßenmitte) mittels eines Schwellenwerts begrenzt werden. Dieser Schwellenwert variiert in Abhängigkeit der folgenden Variablen: Er wird durch einen geringeren Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte, eine höhere Fahrzeugklasse des Gegenverkehrs und höhere Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs verringert.

Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde eine Online-Studie durchgeführt, in der die Teilnehmenden ähnlich zu Studie 3 verschiedene Videosequenzen simulierter Fahrten subjektiv evaluieren sollten. Es folgen die Methodik der Studie, die Ergebnisse sowie deren Diskussion.

7.2. Methode

Im Rahmen der Studie 4 war es die Aufgabe der Versuchspersonen, in einer Online-Studie Videosequenzen automatisierter Fahrten zu bewerten. Im Folgenden sind das Material der Studie, das Design, der Ablauf sowie die Stichprobe beschrieben.

7.2.1. Material und Design. Die Studie wurde mit dem Online-Umfragetool Survey Monkey® (Finley & Finley, 2017) erstellt. Die Videoerstellung erfolgte mittels des im Rahmen der Dissertation entwickelten Java-Tools (s. Kapitel 5.2.2.1) in der Silab Version 4.0 (WIVW GmbH, Veitshöchheim, Germany). Die Videos zeigten automatisierte Fahrten aus der Perspektive der Person auf dem Fahrersitz. Es waren keine Fahrzeugkomponenten, d. h. ein Referenzpunkt, sichtbar. Wie in Studie 2 erörtert (s. Kapitel 5.2.2.1), wurden durch diese Tatsache allerdings keine Verzerrungen der

subjektiven Fahrleistungsbewertung erwartet. In den Videos wurde eine gradeausführende Landstraße mit zwei Fahrstreifen dargestellt (Fahrstreifenbreite: 3.50 m). Es gab keinen mitfließenden Verkehr. Der Gegenverkehr hatte, sofern er vorhanden war, eine Geschwindigkeit von 80 km/h. Die Breite des Ego-Fahrzeugs betrug 1.67 m.

Die Generierung spezifischer Verkehrsszenarien ergab sich durch die Kombination der folgenden drei Situationsfaktoren, die als Zwischensubjekt-Faktoren dienten:

- Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte (bezogen auf die Außenkante des Gegenverkehrs): kein Gegenverkehr / Abstand 0.85 m / Abstand 0.35 m / Abstand 0.05 m (s. Abbildung 22)
- Fahrzeugklasse des Gegenverkehrs: kein Gegenverkehr / PKW (Breite 1.79 m) / LKW (Breite: 2.40 m)
- Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs: 50 km/h / 70 km/h

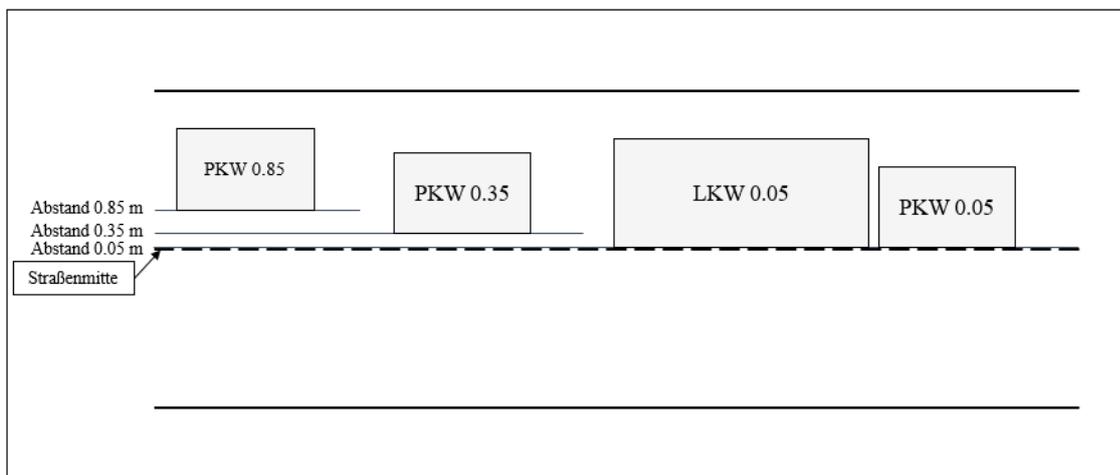


Abbildung 22. Schematische Darstellung des Zwischensubjekt-Faktors Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte in Studie 4

Die Ausprägungen dieser Faktoren wurden zu neun spezifischen Fahrscenarien kombiniert (s. Abbildung 23). Es wurden nicht alle vierzehn mögliche Kombinationen der Variablenausprägungen realisiert, sondern vor allem diese ausgewählt, die für die Untersuchung der Haupteffekte der drei Zwischensubjekt-Faktoren zentral waren. Jedes Fahrscenario stellte eine Fragebogenversion dar, d. h., es ergaben sich neun Fragebogenversionen. In jeder Version wurde als Innersubjekt-Faktor der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte nach links (bezogen auf die Mitte des Ego-Fahrzeugs) variiert. Die Variable hatte acht Ausprägungen von 0.2 m über 0.3 m zu

0.9 m, wobei wie in Studie 3 in keiner dieser Ausprägungen ein Kollisionsrisiko mit dem Gegenverkehr bestand. Für jede der Ausprägungen wurde eine Videosequenz generiert. Dieser Schritt führte zu acht Videosequenzen pro Fragebogenversion. Die Dauer pro Video betrug 30 s.

Abstand Gegenverkehr (Zwischensubjekt)	Kein Gegenverkehr		Abstand 0.85 m		Abstand 0.35 m		Abstand 0.05 m																	
Fahrzeugklasse Gegenverkehr (Zwischensubjekt)	Kein Gegenverkehr		PKW		PKW		LKW	PKW																
Geschwindigkeit Ego-Fahrzeug (Zwischensubjekt)	50 km/h	70 km/h	50 km/h																					
	Fragebogen Version A		Fragebogen Version B		Fragebogen Version C		Fragebogen Version D		Fragebogen Version E		Fragebogen Version F		Fragebogen Version G	Fragebogen Version H		Fragebogen Version I								
Lateralversatz Ego-Fahrzeug (Innersubjekt)	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m	0.8 m	0.9 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m	0.8 m	0.9 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m	0.8 m	0.9 m

Abbildung 23. Spezifische Fahrzenarien der Studie 4

höchst kritisch	10
kritisch	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
angenehm	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Abbildung 24. Komfort-Sicherheits-Skala

Als AV dienen in der Studie ein dichotomes Item zur Angemessenheitsbewertung der Position des Ego-Fahrzeugs auf der Straße („angemessen“/„nicht angemessen“), der Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung („ja“/„nein“) sowie eine von der Neukum-Skala (Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayer & Steinle, 2008) abgeleitete elf-stufige Komfort-Sicherheits-Skala (s. Abbildung 24). Diese Differenzierung in die zwei Konstrukte Komfort und Sicherheit wurde von den Ergebnissen der Studie 2

abgeleitet. Hier wurde zwar ein einfaktorielles Faktorenkonstrukt extrahiert, die Items desselben ließen sich aber den zwei semantischen Kategorien von Komfort und Sicherheit zuordnen (s. Kapitel 5.6).

7.2.2. Ablauf. Die Studie fand im September 2017 statt. Jede Versuchsperson bearbeitete eine der neun Fragebogenversionen, zu der sie zufällig zugeteilt wurde. Es fand eine balancierte Verteilung der Teilnehmenden auf die verschiedenen Versionen statt. Diese Gestaltung als Zwischensubjekt-Design wurde aus testökonomischen Gründen gewählt. Die hohe Anzahl von bis zu acht zu bewertenden Videos innerhalb einer Fragebogenversion hätte andernfalls bei der Bearbeitung von mehr als einer Fragebogenversion zu einer erhöhten Abbruchquote führen können. Innerhalb ihrer Fragebogenversion war es die Aufgabe der Versuchspersonen, die in den Videos gezeigten automatisierten Fahrten hinsichtlich der Position des eigenen Fahrzeugs auf der Straße über die genannten Items zu bewerten (Angemessenheit, Eingriffswunsch und Komfort-Sicherheits-Skala). Es wurde instruiert, dass es keine richtigen oder falschen Antworten gäbe und dass die Videos beliebig oft wiederholt werden könnten. Jede Versuchsperson begann mit dem Video der Ego-Trajektorie mit einem Lateralversatz von 0.2 m. Sofern die automatisierte Fahrt als angemessen bewertet wurde, wurde das Video mit dem nächsthöheren Lateralversatz gezeigt (inkrementelle Steigerung um jeweils 0.1 m). Sobald die Versuchsperson eine Trajektorie als nicht angemessen bewertete, wurde dies als Abbruchkriterium genutzt und die nachfolgenden Videos wurden nicht mehr gezeigt.

7.2.3. Stichprobe. Die Versuchspersonenakquise fand über persönlichen Kontakt, soziale Netzwerke und die Versuchspersonendatenbank des ika statt. 229 Versuchspersonen begannen die Online-Umfrage. $N = 203$ Teilnehmende (23.2 % weiblich) schlossen die Befragung erfolgreich ab. Somit lag die Abschlussquote bei 88.6 %. Über alle Fragebogenversionen hinweg waren die Versuchspersonen $M = 35$ Jahre alt ($SD = 15$) und hatten eine durchschnittliche jährliche Kilometerleistung von $M = 15827$ km ($SD = 18282$). Die Versuchspersonen erhielten keine Incentivierung. In Tabelle 14 ist die demografische Verteilung pro Fragebogenversion abgetragen.

Tabelle 14

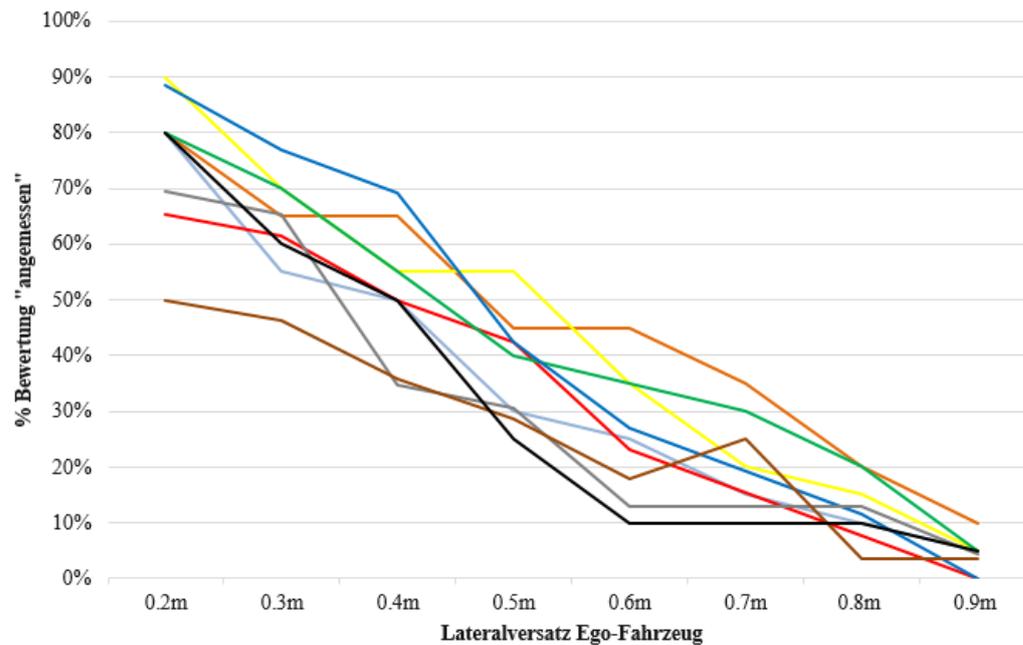
Demografie der Versuchspersonen in den neun Fragebogenversionen der Studie 4

Fragebogenversion	N	Geschlecht	Alter	Jahre Führer- scheinbesitz	Fahrerfahrung (jähr- lich gefahrene km)
A - Kein Gegenverkehr, 50 km/h Ego	20	25.0 % weiblich	$M = 36$ ($SD = 16$)	$M = 18$ ($SD = 15$)	$M = 15938$ ($SD = 12967$)
B - Kein Gegenverkehr, 70 km/h Ego	20	10.0 % weiblich	$M = 31$ ($SD = 11$)	$M = 13$ ($SD = 11$)	$M = 12425$ ($SD = 7594$)
C - PKW mit Abstand 0.85 m, 50 km/h Ego	26	19.2 % weiblich	$M = 40$ ($SD = 20$)	$M = 22$ ($SD = 20$)	$M = 13142$ ($SD = 8752$)
D - PKW mit Abstand 0.85 m, 70 km/h Ego	20	40.0 % weiblich	$M = 35$ ($SD = 14$)	$M = 17$ ($SD = 14$)	$M = 14201$ ($SD = 13846$)
E - PKW mit Abstand 0.35 m, 50 km/h Ego	20	25.0 % weiblich	$M = 32$ ($SD = 14$)	$M = 13$ ($SD = 13$)	$M = 22650$ ($SD = 31666$)
F - PKW mit Abstand 0.35 m, 70 km/h Ego	26	23.1 % weiblich	$M = 34$ ($SD = 16$)	$M = 16$ ($SD = 15$)	$M = 22020$ ($SD = 34480$)
G - LKW mit Abstand 0.05 m, 50 km/h Ego	23	26.1 % weiblich	$M = 37$ ($SD = 16$)	$M = 19$ ($SD = 16$)	$M = 14386$ ($SD = 11056$)
H - LKW mit Abstand 0.05 m, 70 km/h Ego	28	10.7 % weiblich	$M = 33$ ($SD = 14$)	$M = 15$ ($SD = 13$)	$M = 15482$ ($SD = 8110$)
I - PKW mit Abstand 0.05 m, 50 km/h Ego	20	35.0 % weiblich	$M = 34$ ($SD = 13$)	$M = 16$ ($SD = 13$)	$M = 11608$ ($SD = 10406$)

7.3. Ergebnisse

Im Rahmen der Datenanalyse wurden zur Beantwortung der Hypothese H1 sowohl deskriptive als auch inferenzstatische Verfahren herangezogen. So wurde die Bewertung der Angemessenheit betrachtet, Schwellenwerte subjektiv angemessen empfundener Fahrleistungen für den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs pro Fahrscenario berechnet und näher untersucht sowie der Zusammenhang zwischen den verschiedenen AV analysiert. Die folgenden Kapitel beinhalten die Ergebnisse zu diesen Schritten.

7.3.1. Bewertung der Angemessenheit. Abbildung 25 beinhaltet die prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung über die Lateralversätze des Ego-Fahrzeugs. Dieses Diagramm zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für ein angemessenes Rating in allen Fahrscenarien bei steigendem Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs abnahm.



Abstand Gegenverkehr	Kein Gegenverkehr		Abstand 0.85 m		Abstand 0.35 m		Abstand 0.05 m		
Fahrzeugklasse Gegenverkehr	Kein Gegenverkehr		PKW		PKW		LKW	PKW	
Geschwindigkeit Ego-Fahrzeug	50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h	50 km/h	70 km/h	50 km/h
Fragebogenversion	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Abbildung 25. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung pro Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs und des Fahr Szenarios in Studie 4

7.3.2. Schwellenwertbestimmung einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes. Der zentrale Zweck der Studie 4 lag in der Bestimmung der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs und der Analyse des Einflusses der verschiedenen manipulierten Situationsfaktoren auf diese Schwellenwerte (s. H1).

Zur Bestimmung eines Schwellenwerts wurde pro Versuchsperson der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs ermittelt, den die Versuchsperson als nicht angemessen bewertete. Fälle, in denen auch der höchste Lateralversatz (0.9 m) noch als angemessen bewertet wurde, wurden von allen weiteren Analysen ausgeschlossen, da für sie eine Schwellenwertbestimmung nicht möglich war. Dies betraf $n = 8$ Versuchspersonen,

sodass schließlich $n = 195$ Fälle in der Auswertung berücksichtigt werden konnten. Tabelle 15 zeigt die resultierenden mittleren Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes. Diese Schwellenwerte stellen die Trajektorie bzw. den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs dar, der als nicht angemessen bewertet wurde.

Tabelle 15

Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs sowie die Ergebnisse der Komfort-Sicherheits-Skala am Schwellenwert in Studie 4

Fragebogenversion	Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung (Lateralversatz)	Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala am Schwellenwert
A - Kein Gegenverkehr, 50 km/h Ego	$M = 0.44$ m; $SD = 0.22$	$M = 5.42$; $SD = 1.02$
B - Kein Gegenverkehr, 70 km/h Ego	$M = 0.52$ m; $SD = 0.26$	$M = 5.44$; $SD = 1.50$
C - PKW mit Abstand 0.85 m, 50 km/h Ego	$M = 0.47$ m; $SD = 0.24$	$M = 5.38$; $SD = 1.44$
D - PKW mit Abstand 0.85 m, 70 km/h Ego	$M = 0.53$ m; $SD = 0.22$	$M = 5.95$; $SD = 1.22$
E - PKW mit Abstand 0.35 m, 50 km/h Ego	$M = 0.51$ m; $SD = 0.26$	$M = 5.79$; $SD = 1.36$
F - PKW mit Abstand 0.35 m, 70 km/h Ego	$M = 0.54$ m; $SD = 0.22$	$M = 5.96$; $SD = 1.25$
G - LKW mit Abstand 0.05 m, 50 km/h Ego	$M = 0.42$ m; $SD = 0.21$	$M = 5.73$; $SD = 1.45$
H - LKW mit Abstand 0.05 m, 70 km/h Ego	$M = 0.37$ m; $SD = 0.21$	$M = 6.44$; $SD = 1.53$
I - PKW mit Abstand 0.05 m, 50 km/h Ego	$M = 0.42$ m; $SD = 0.18$	$M = 5.63$; $SD = 1.74$
Gesamt	$M = 0.47$ m; $SD = 0.23$	$M = 5.77$; $SD = 1.42$

Nach dieser eigentlichen Schwellenwertbestimmung für den Lateralversatz galt es, den Einfluss der verschiedenen Situationsfaktoren auf die Ausprägung des Schwellenwerts zu untersuchen. Hierzu wurde eine einfaktorielle ANOVA mit der UV Frage-

bogenversion (Version A bis I) und der AV Schwellenwert gerechnet. Es zeigten sich keine signifikanten Effekte, sodass geschlossen werden kann, dass die subjektive Fahrleistungsbewertung und der konkrete Schwellenwert einer subjektiv angemessenen Fahrleistung für den Lateralversatz in den aktuellen Fahrszenarien nicht von der Ausprägung der Situationsfaktoren abhing. Als solches kann für die getesteten Szenarien ein allgemeiner Schwellenwert gebildet werden ($M = 0.47$ m; $SD = 0.23$, s. Tabelle 15).

Zur näheren Untersuchung dieser Schwellenwerte wurde die Komfort-Sicherheits-Skala am Schwellenwert pro Versuchsperson ausgewertet. Tabelle 15 beinhaltet die resultierenden mittleren Skalenwerte pro Fahrszenario. Zur inferenzstatistischen Absicherung wurde auch hier eine einfaktorielle ANOVA mit der UV Fragebogenversion (Version A bis I) und der AV Wert der Komfort-Sicherheits-Skala berechnet. Es zeigten sich erneut keine signifikanten Effekte, was den Schluss zulässt, dass sich die Bewertung des Komforts und der Sicherheit am Schwellenwert nicht zwischen den Fahrszenarien unterschied. Aus diesem Grund kann auf einen allgemeinen Wert der Komfort-Sicherheits-Skala zurückgegriffen werden ($M = 5.77$; $SD = 1.42$, s. Tabelle 15). Dieser Wert von $M = 5.77$ liegt in der verbalen Kategorie „unangenehm“ und zeigt, dass eine Fahrt nicht erst kritisch sein muss, damit sie als nicht angemessen bewertet wird.

7.3.3. Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen. Ein weiterer Analyseschritt betraf die Untersuchung des Zusammenhangs der AV Angemessenheitsbewertung, Eingriffswunsch und Komfort-Sicherheits-Skala. Zu diesem Zweck wurden Spearman-Korrelationen (Maß der Korrelation für non-parametrische Daten) für alle von den Versuchspersonen bewerteten Videos berechnet. Es ergaben sich signifikante Korrelationen ($p < .001$) von $r = .726$ (Angemessenheit*Eingriffswunsch), $r = -.663$ (Angemessenheit*Komfort-Sicherheits-Skala) und $r = -.721$ (Eingriffswunsch*Komfort-Sicherheits-Skala). Dies bedeutet, dass die Wahrnehmung der Angemessenheit einer Trajektorie, der Wunsch nach einem Eingriff sowie das Komfort-/ Sicherheitsempfinden stark voneinander abhängig sind. Abbildung 26 und Abbildung 27 stellen diesen Zusammenhang dar, indem sie illustrieren, wie sich die beiden binären AV (Angemessenheit und Eingriffswunsch) zur Komfort-Sicherheits-Skala verhalten. In den Grafiken sind jeweils die prozentualen Häufigkeiten der Bewertungen in Relation zueinander abgetragen. Dabei sind Häufigkeiten größer als 10 % markiert. Anhand die-

ser zwei Abbildungen wird ersichtlich, dass die Bewertung der Angemessenheit einer automatisierten Fahrt neben dem Komfort auch für die wahrgenommene Sicherheit von Relevanz war. Fahrten, die als nicht angemessen eingestuft wurden, lagen auf der Komfort-Sicherheits-Skala in einem unangenehmen bzw. kritischen Bereich (s. Abbildung 26). Ebenfalls schienen Fahrerinnen und Fahrer einen Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung zu hegen, sobald der Komfortbereich auf der Komfort-Sicherheits-Skala verlassen wurde (s. Abbildung 27).

	Nicht angemessen	Angemessen			
10	1.0 % (n = 2)	0 % (n = 0)	„Sicherheitsbereich“	höchst kritisch	10
9	2.6 % (n = 5)	0 % (n = 0)		kritisch	9
8	5.1 % (n = 10)	0 % (n = 0)			8
7	21.9 % (n = 43)	1.6 % (n = 9)	„Übergangsbereich“		7
6	26.0 % (n = 51)	1.4 % (n = 8)		unangenehm	6
5	25.0 % (n = 49)	7.3 % (n = 42)			5
4	15.8 % (n = 31)	15.0 % (n = 87)	„Komfortbereich“		4
3	1.5 % (n = 3)	19.9 % (n = 115)			3
2	0.5 % (n = 1)	17.8 % (n = 103)		angenehm	2
1	0.5 % (n = 1)	19.0 % (n = 110)			1
0	0 % (n = 0)	18.1 % (n = 105)		nichts bemerkt	0

Markiert wurden Werte > 10 %

Abbildung 26. Zusammenhang zwischen der Angemessenheitsbewertung und der Komfort-Sicherheits-Skala in Studie 4

	Eingriff beabsichtigt	Kein Eingriff beabsichtigt			
10	0.8 % (n = 2)	0 % (n = 0)	„Sicherheitsbereich“	höchst kritisch	10
9	2.0 % (n = 5)	0 % (n = 0)		kritisch	9
8	3.9 % (n = 10)	0 % (n = 0)			8
7	20.5 % (n = 52)	0 % (n = 0)	„Übergangsbereich“		7
6	20.1 % (n = 51)	1.5 % (n = 8)		unangenehm	6
5	25.2 % (n = 64)	5.2 % (n = 27)			5
4	22.4 % (n = 57)	11.7 % (n = 61)	„Komfortbereich“		4
3	2.8 % (n = 7)	21.3 % (n = 111)			3
2	2.0 % (n = 5)	19.0 % (n = 99)		angenehm	2
1	0.4 % (n = 1)	21.1 % (n = 110)			1
0	0 % (n = 0)	20.2 % (n = 105)		nichts bemerkt	0

Markiert wurden Werte > 10 %

Abbildung 27. Zusammenhang zwischen dem Eingriffswunsch und der Komfort-Sicherheits-Skala in Studie 4

7.4. Diskussion

In Fortführung der Erkenntnisse aus Studie 3 zur Lokalisation der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateral-

versatzes diente Studie 4 der weiterführenden Untersuchung und Bestimmung dieser Schwellenwerte (zweites offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.2). Es wurde die Fragestellung untersucht, welche Lokalisation die Schwellenwerte einer subjektiv angemessenen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs im automatisierten Fahren in Abhängigkeit spezifischer Situationsfaktoren besitzen. Konkret wurde die folgende Hypothese H1 untersucht:

H1: Der Bereich einer subjektiv angemessenen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes kann nach links (d. h. in Richtung der Straßenmitte) mittels eines Schwellenwerts begrenzt werden. Dieser Schwellenwert variiert in Abhängigkeit der folgenden Variablen: Er wird durch einen geringeren Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte, eine höhere Fahrzeugklasse des Gegenverkehrs und höhere Geschwindigkeiten des Ego-Fahrzeugs verringert.

Vergleichbar zu den vorherigen Studien der Dissertation soll an dieser Stelle eine Beantwortung der Hypothese sowie eine inhaltliche und methodische Diskussion der Ergebnisse vorgenommen werden. Die Ergebnisse der Studie 4 zeigten keine Unterschiede in der subjektiven Trajektorienbewertung zwischen den verschiedenen Fahrscenarien, sodass für den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs auf einen mittleren Schwellenwert einer subjektiv angemessenen Fahrleistung von 0.47 m geschlossen werden konnte. Auf Einzelbasis lag der niedrigste aller Schwellenwerte bei 0.37 m (s. Abbildung 25 und Tabelle 15). Aus diesem Grund kann die Hypothese H1 der Studie nur teilweise bestätigt werden. Zwar konnte ein Schwellenwert festgelegt werden, dieser variierte aber nicht in Abhängigkeit der manipulierten Situationsfaktoren. Wie in Studie 3 (s. Kapitel 6.4) wich dieser subjektive Zielwert von einer Fahrleistung mit einem objektiven Kollisionsrisiko ab. Dies hebt erneut die Dialektik zwischen der psychologischen und technischen Perspektive im Themenfeld der Fahrleistungen hervor.

Bezogen auf die Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015, Voß & Schwalm, 2015) könnten diese Ergebnisse bedeuten, dass es für den supervisory controller in den getesteten Szenarien des automatisierten Fahrens, in denen der Gegenverkehr auf dessen Fahrstreifen verbleibt, nicht von Relevanz ist, was außerhalb des eigenen Fahrstreifens geschieht. Zur Reduzierung von Belastung und Beanspruchung scheint es im automatisierten Fahren so zu sein, dass in unkritischen Szenarien ein konservatives Kriterium herangezogen wird, welchem dem eines kritischeren Szenarios entspricht. Es ist dieser allgemeine Zielwert von

maximal 0.47 m Lateralversatz, mit dem die aktuelle bzw. erwartete Trajektorie einer automatisierten Fahrfunktion abgeglichen wird und der für die Aktivierung kompensativer Handlungen relevant sein könnte. Dieser Schwellenwert schien dabei bereits dann erreicht zu sein, wenn Fahrerinnen und Fahrer eine automatisierte Fahrt als unangenehm bewerteten (und nicht erst, wenn sie als kritisch eingestuft wurde). In diesem Fall berichteten die Teilnehmenden einen Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung (s. Abbildung 26 und Abbildung 27). Basierend auf den aktuellen Ergebnissen und in Fortführung der Schlussfolgerungen der Studie 3 (s. Kapitel 6.4) erscheint es somit erneut sinnvoll, automatisierte Trajektorien hinsichtlich der Querführung auf die subjektiven Präferenzen der Fahrerinnen und Fahrer abzustimmen, um mögliche Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung zu verhindern.

In Summe lieferten sowohl Studie 3 als auch Studie 4 somit wichtige Informationen zur Untersuchung und Spezifikation des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung. Es wurden Schwellenwerte hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs im automatisierten Fahren bestimmt. Hierauf wird auch im Rahmen der generellen Diskussion (s. Kapitel 10.1.2) nochmals eingegangen. Es gibt allerdings einige Punkte, die in zukünftigen Studien weiter erforscht bzw. beachtet werden sollten. Erstens fanden die bisherigen Erhebungen in Szenarien des automatisierten Fahrens statt, in denen der Gegenverkehr die Fahrbahnmitte nicht überschritt. Es ist offen, wie sich die subjektive Fahrleistungsbewertung in kritischeren Szenarien, in denen der Gegenverkehr teilweise auf dem Ego-Fahstreifen fährt, verändert.

Zweitens fanden die Untersuchungen in beiden Studien im Rahmen von Online-Studien statt. Solche Online-Erhebungen haben den entscheidenden Nachteil, dass die Versuchsumgebung nur schwierig zu standardisieren ist. Zwischen den Versuchspersonen können sowohl die Video- als auch die Displaygrößen variieren. Unterschiede in der Wahrnehmung aufgrund einer besseren Visualisierung von Szenariodetails (z. B. der tatsächliche Abstand des Gegenverkehrs zum eigenen Fahrzeug) können somit nicht ausgeschlossen werden. Gleichermaßen können die Sitzpositionen der Versuchspersonen bzw. der Abstand und die Position des Kopfes der Versuchspersonen in Relation zum zur Darstellung genutzten Display variieren. Zum Nachweis, dass die Ergebnisse der Studien 3 und 4 dennoch valide sind und für die Auslegung automatisierter Fahrfunktionen herangezogen werden können, müssen die identifizierten Schwellenwerte in einer standardisierten und realistischeren Umgebung repliziert werden. Die Studien 5

und 6 der vorliegenden Dissertation nahmen sich dieser Forderung an und erstrebten eine Replikation der Ergebnisse im Simulator bzw. auf der Teststrecke.

Drittens und letztens ist die empirische Überprüfung der theoretisch postulierten Handlungsrelevanz der subjektiven Schwellenwerte hinsichtlich des Lateralversatzes zu leisten (drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3). In den Diskussionen der Studien 3 und 4 wurde gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) angenommen, dass die Überschreitung der Schwellenwerte (d. h. eine Diskrepanz zwischen der aktuellen Fahrleistung und dem Zielwert in derselben) zur Auslösung kompensativer Handlungen bzw. funktionaler Verhaltensanpassungen auf den drei Pfaden des Arbeitsmodells führen kann. Bislang steht ein empirischer Nachweis dieses Zusammenhangs allerdings noch aus. Die nachfolgenden Studien 5 und 6 nahmen sich dieser Forderung an und hatten die Untersuchung der Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen als zentralen Forschungsgegenstand.

8. Studie 5 – Untersuchung der Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung im Sinne der funktionalen Verhaltensanpassungen

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0685/2016 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0685/2016.

The author is solely responsible for the content.

8.1. Zielsetzung und Hypothesen

Ausgehend von Studie 1, die die funktionalen Verhaltensanpassungen in einer sich verändernden Fahrsituation untersuchte, und den Studien 2 bis 4, die sich mit der subjektiven Fahrleistungsbewertung beschäftigten, verfolgte Studie 5 für diese zwei Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sich zwei hieraus ergebende Fragestellungen, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels gemäß Kapitel 3.2.5 nochmals aufgegriffen und in Form von Hypothesen konkretisiert werden. Aufgrund der Entwicklungen des automatisierten Fahrens wurde die Studie 5 erneut in diesem Kontext realisiert. Insgesamt wurde die empirische Untersuchung der Fragestellungen von der Autorin der vorliegenden Dissertation im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2019). Die Studie 5 fand im Fahrsimulator statt und gliederte sich in eine Vor- und Hauptstudie, wobei jede der Studien eine der Fragestellungen untersuchte.

In den Studien 3 und 4 wurden die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes jeweils im Rahmen einer Online-Studie bestimmt. Zur Unterstützung der dort erlangten Erkenntnisse wurde in der aktuellen Studie 5 im Rahmen einer Vorstudie (Kapitel 8.2) die Fragestellung untersucht, inwiefern sich diese Schwellenwerte im realistischeren Szenario einer Fahrsimulation bestätigen lassen und somit die Methode der vorherigen Studien eine valide, aufwandsreduzierte Alternative darstellte (s. Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Die Un-

tersuchung dieser Fragestellung fokussierte sich auf die Ergebnisse bzw. den erhobenen Schwellenwert der Studie 4, da hier die subjektive Fahrleistungsbewertung im Kontext des automatisierten Fahrens stattfand. Der mittlere Schwellenwert über alle Fragebogenversionen war in dieser Studie 0.47 m. Der Bereich der Schwellenwerte über die Fragebogenversionen lag zwischen 0.37 m und 0.54 m. Im Sinne der konfirmatorischen Überprüfung ergab sich hieraus die folgende Hypothese H1:

H1: Automatisierte Trajektorien, die unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Fahrsimulator in den Fahrszenarien der Studie 4 als angemessen bzw. angenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben keinen Eingriffswunsch.

Ausgehend von den Ergebnissen der Studie 4, gemäß welchen eine automatisierte Trajektorie als angemessen bewertet wird, wenn der Gegenverkehr im eigenen Fahrstreifen fährt, ergab sich die Überlegung, dass sich die subjektive Wahrnehmung ändert, sobald der Gegenverkehr die Fahrbahnmitte überschreitet. Dies ist in Hypothese H2 formuliert, die ebenfalls im Rahmen der Vorstudie untersucht wurde:

H2: Automatisierte Trajektorien, die in Fahrszenarien, in denen der Gegenverkehr im eigenen Fahrstreifen fährt, noch als angemessen bewertet werden, werden in Szenarien, in denen der Gegenverkehr die Fahrbahnmitte überschreitet, als nicht angemessen bzw. unangenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben einen Eingriffswunsch.

Gemäß Kapitel 3.2.5 beschäftigte sich eine zweite Fragestellung mit dem Zusammenhang der zuvor konfirmatorisch überprüften subjektiven Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes und der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren (s. Abbildung 8, blaue Hervorhebung und drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3). Diese Fragestellung beruhte auf der theoretischen Annahme des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015, Voß & Schwalm, 2015), dass funktionale Verhaltensanpassungen nicht nur in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung (s. Studie 1), sondern auch basierend auf der subjektiven Fahrleistungsbewertung auftreten können. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde die Hauptstudie der Studie 5 (Kapitel 8.3) durchgeführt, in der die Teilnehmenden neben der Fahraufgabe (automatisierte Fahrt) eine zusätzliche FFT bearbeiteten.

Die Überlegungen von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) zu den Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das Fahrerverhalten ließen für diese Studie, wie bereits für Studie 1, erneut annehmen, dass Fahrerinnen und Fahrer im automatisierten Fahren ein erhöhtes FFT-Level haben, um so ein mittleres Arousallevel beibehalten zu können. Solange die Fahrzeugtrajektorie während der Fahrt in einem subjektiv angemessenen Bereich liegt, d. h. solange die Fahrt für den supervisory controller unkritisch ist, ist in diesem Verhalten auch keine Veränderung zu erwarten, da gemäß dem Arbeitsmodell keine Handlungsrelevanz besteht (es werden keine funktionalen Verhaltensanpassungen aufgrund der Trajektorienwahrnehmung ausgelöst). Dies ist in Hypothese H3 zusammengefasst:

H3: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt nicht überschritten wird, greifen Fahrerinnen und Fahrer nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als angemessen und angenehm.

Kommt es zu einer durch den supervisory controller detektierten Diskrepanz zwischen der aktuellen bzw. antizipierten Fahrleistung und dem Zielwert, ist gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) anzunehmen, dass es zu einer Auslösung kompensativer Handlungen (d. h. zur diskutierten Handlungsrelevanz in Form von Eingriffen in die automatisierte Fahrzeugführung) auf den Pfaden 1 und 3 kommt. Im Falle einer solchen kritischen Fahrsituation würden Fahrerinnen und Fahrer vergleichbar zu Studie 1 im Sinne eines proaktiven Handlungsmechanismus die FFT reduzieren, um somit (kognitive) Ressourcen zur Lösung der Fahraufgabe freizugeben und ein zu hohes Arousallevel zu vermeiden. Aus diesen Überlegungen ergab sich die folgende Hypothese H4:

H4: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt überschritten wird, reduzieren Fahrerinnen und Fahrer proaktiv die FFT und greifen in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als nicht angemessen und unangenehm.

Ein Wissen über die Handlungsrelevanz der Schwellenwerte gemäß den Hypothesen H3 und H4 ließe erste Schlussfolgerungen darüber zu, ob die Schwellenwerte neben einer Komfortrelevanz (automatisierte Trajektorien über dem Schwellenwert

werden als nicht angemessen bewertet) auch eine Sicherheitsrelevanz (Fahrerinnen und Fahrer greifen trotz möglicherweise fehlender Involvierung in die Fahraufgabe in die automatisierte Fahrzeugführung ein) besitzen. Sofern dies zuträfe, sollten automatisierte Systeme über adaptive Mechanismen der Trajektorienplanung verfügen, die die automatisierte Trajektorie jederzeit in einem subjektiv akzeptierten Bereich halten und somit Eingriffe in die Fahrzeugführung verhindern würden.

Im Folgenden sind die Methode, die Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen jeweils für die Vorstudie (Kapitel 8.2) und die Hauptstudie (Kapitel 8.3) berichtet.

8.2. Vorstudie

Die Vorstudie der Studie 5 diente der konfirmatorischen Überprüfung der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes aus Studie 4. Im Folgenden sind die Methode, die Ergebnisse sowie eine Diskussion derselben berichtet.

8.2.1. Methode. Im Rahmen der Vorstudie absolvierten die Versuchspersonen zur konfirmatorischen Überprüfung der in Studie 4 bestimmten Schwellenwerte diverse automatisierte Fahrtsequenzen im Fahrsimulator, die sie subjektiv bewerten sollten. Im Folgenden sind das Material, das Design, der Ablauf sowie die Stichprobe beschrieben.

8.2.1.1. Material.

8.2.1.1.1. Fahrsimulator und Fahrszenarien. Die Vorstudie wurde im statischen Fahrsimulator des Instituts für Straßenwesen (ISAC) der RWTH Aachen University durchgeführt. Die Projektionsfläche der Simulationsumgebung betrug 3.40×1.80 m. Ein Fiat Panda (Baujahr 1995) diente als Mock-up. Die Simulationssoftware war eine Kombination aus Opensource (Blender), In-House (Random Array) und kommerzieller Software (unity³) (Volkenhoff & Lank, 2011). Abbildung 28 zeigt die gesamte Simulationsumgebung. Die hard- und softwareseitigen Vorbereitungen der Studie sowie die technische Versuchsbegleitung fanden durch das ISAC statt.

Studie 4 zeigte, dass sich die subjektive Fahrleistungsbewertung zwischen den getesteten Fahrszenarien nicht unterschied (s. Kapitel 7.3.2), sodass die konfirmatorische Schwellenwertüberprüfung insgesamt für ein ausgewähltes Szenario aus Studie 4

durchgeführt werden konnte. Vor dem Hintergrund, dass in Studie 6 eine weiterführende Überprüfung auf einer Teststrecke (s. Kapitel 3.2.6) geplant war, wurde entschieden, aus den möglichen Szenarien eines auszuwählen, welches in einer Realfahrt sicher darstellbar ist (z. B. Vermeidung zu hoher Geschwindigkeiten). Als solches wurde eine fünf Kilometer lange Strecke in einem Landstraßenszenario mit zwei Fahrstreifen (Fahrstreifenbreite: 3.50 m) dargestellt, in dem sich leicht kurvige und geradeausführende Streckenpassagen abwechselten (s. Abbildung 29). Verkehrsschilder begrenzten die Geschwindigkeit auf 50 km/h. Es gab keinen mitfließenden Verkehr, aber einen entgegenkommenden PKW (Breite: 1.79 m), der einen der drei folgenden Abstände zur Straßenmitte (bezogen auf die Außenkante des Gegenverkehrs) haben konnte (s. Abbildung 30):

- Abstand 0.85 m (Szenario aus Studie 4)
- Abstand 0.35 m (Szenario aus Studie 4)
- Abstand -0.15 m (zusätzliches Szenario)

Das zusätzliche Szenario Abstand -0.15 m, welches nicht in Studie 4 implementiert war, wurde zur Untersuchung der Hypothese H2 realisiert. Es bestand die Erwartung, dass dieses Szenario, in dem der Gegenverkehr die Straßenmitte zu 0.15 m überschritt, eine veränderte subjektive Fahrleistungsbewertung und in Folge eine andere Handlungsrelevanz hervorriefe (d. h., die Versuchspersonen würden eingreifen wollen).



Abbildung 28. Simulationsumgebung des statischen Fahrsimulators am ISAC (Bildquelle: ISAC)



Abbildung 29. Fahrszenario des Simulatorversuchs in Studie 5 im Fahrsimulator des ISAC (Bildquelle: ISAC)

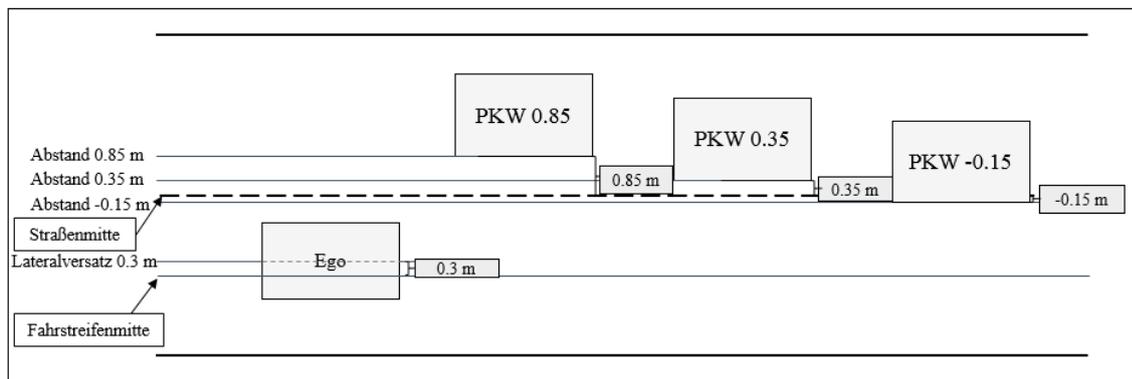


Abbildung 30. Position des Ego-Fahrzeugs und des Gegenverkehrs im Simulatorversuch der Studie 5

8.2.1.1.2. *Automatisiertes System.* Wie bereits kurz erwähnt, absolvierten die Versuchspersonen diverse automatisierte Fahrtsequenzen. Das erlebte automatisierte System, welches über das Betätigen der Lichthupe (de-) aktiviert werden konnte, war in der Lage Längs- und Querführung eigenständig auszuführen. Es richtete sich nach dem vorgegebenen Geschwindigkeitslimit und fuhr, sofern möglich, konstant 50 km/h. Bei aktivem System fuhr das Ego-Fahrzeug in Anlehnung an Studie 4 konstant mit einem Lateralversatz von 0,3 m von der Fahrstreifenmitte nach links (bezogen auf die Mitte des Ego-Fahrzeugs, s. Abbildung 30). Dieser Lateralversatz wurde gewählt, da er geringer als der niedrigste Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes aller Fragebogenversionen in Studie 4 war.

8.2.1.1.3. *Fragebögen.* Die automatisierten Fahrtsequenzen wurden über drei Subjektivfragen im Rahmen einer paper-pencil Befragung evaluiert. Sie entsprachen denen der zu überprüfenden Online-Studie (Angemessenheit, Eingriffswunsch, Komfort-Sicherheits-Skala, s. Kapitel 7.2.1).

8.2.1.2. Design. Im Rahmen der Studie wurde eine UV, der Innersubjekt-Faktor Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m, Abstand 0.35 m, Abstand -0.15 m, s. Abbildung 30), definiert. Pro Faktorausprägung wurde eine Fahrt absolviert, sodass jede Versuchsperson drei Fahrten erlebte. Es erfolgte eine standardisierte Abfolge der Gegenverkehrsszenarien, in der sich der Abstand des Gegenverkehrs pro Fahrt schrittweise verringerte. Die Beantwortungen der Subjektivitems (Angemessenheit, Eingriffswunsch und Komfort-Sicherheits-Skala) dienten als AV.

8.2.1.3. Ablauf. Die Studiendurchführung erfolgte Anfang 2018 und nahm pro Versuchsperson ca. 15-20 min in Anspruch. Nach einer Begrüßung unterzeichnete die Versuchsperson eine Datenschutz- sowie Geheimhaltungserklärung und beantwortete eine sozio-demografische Vorbefragung. Die Versuchsleitung erklärte der Versuchsperson, dass es bei der Studie um die subjektive Bewertung verschiedener automatisierter Fahrten ginge, und beide stiegen in das Fahrzeug ein. Dabei nahm die Versuchsperson auf dem Fahrersitz und die Versuchsleitung auf dem Beifahrersitz Platz. Die Versuchsleitung erläuterte die allgemeine Fahrzeugbedienung sowie das automatisierte System und bat die Versuchsperson, das automatisierte System direkt nach dem Start der Simulation zu aktivieren, sodass bereits die Beschleunigung automatisiert vollzogen würde.

Gemäß dem Studiendesign erlebte die Versuchsperson anschließend drei automatisierte Fahrten, in denen jeweils eine der Ausprägungen der UV dargestellt wurde. Zu den drei Zeitpunkten

- vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. ohne Gegenverkehr, was dem Szenario kein Gegenverkehr aus Studie 4 entspricht)
- bei Erscheinen des Gegenverkehrs (4.4 s vor Passieren des Gegenverkehrs)
- nach Passieren des Gegenverkehrs

stoppte die Simulation und die Versuchsleitung stellte der Versuchsperson die drei Subjektivfragen zur Bewertung der automatisierten Fahrt. Nach Abschluss der Subjektivbefragung lief die automatisierte Fahrt bis zum nächsten Befragungszeitpunkt weiter. Zum Zeitpunkt vor Erscheinen des Gegenverkehrs unterschied sich die Fahrsituation noch nicht zwischen den drei Gegenverkehrsszenarien (es war noch kein Gegenverkehr sichtbar). Aus diesem Grund wurde dieser Zeitpunkt nur im Szenario Abstand 0.85 m abgefragt.

8.2.1.4. Stichprobe. Es nahmen $N = 10$ interne Versuchspersonen von ika und ISAC ($n = 3$ weiblich) an der Vorstudie teil. Bei keiner der Versuchspersonen lag eine unkorrigierte Seh- oder Hörbeeinträchtigung vor. Das Durchschnittsalter betrug $M = 24$ Jahre ($SD = 2$). Die Teilnehmenden erhielten keine Incentivierung.

8.2.2. Ergebnisse. Im Rahmen der konfirmatorischen Überprüfung des in der Online-Studie bestimmten Schwellenwerts fand eine deskriptive Auswertung der Subjektivbewertungen statt. Tabelle 16 beinhaltet die Ergebnisse der drei Items (Angemessenheit, Eingriffswunsch, Komfort-Sicherheits-Skala) pro Abstand des Gegenverkehrs zu jedem der drei Befragungszeitpunkte.

Tabelle 16

Subjektivbewertungen in der Vorstudie der Studie 5

Zeitpunkt	Abstand Ge- genverkehr	Angemessenheit (% angemessen)	Eingriffswunsch (% Eingriff beab- sichtigt)	Komfort- Sicherheits-Skala
Vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. ohne Gegenverkehr)	0.85 m 0.35 m -0.15 m		90 % 0 %	$M = 1.8; SD = 1.1$
Bei Erscheinen des Gegenverkehrs (4.4 s vor Passieren)	0.85 m 0.35 m -0.15 m	90 % 90 % 60 %	0 % 20 % 50 %	$M = 2.0; SD = .9$ $M = 3.1; SD = 2.0$ $M = 4.6; SD = 2.8$
Nach Passieren des Gegenverkehrs	0.85 m 0.35 m -0.15 m	90 % 90 % 20 %	0 % 30 % 90 %	$M = 2.2; SD = 1.3$ $M = 3.6; SD = 2.0$ $M = 7.0; SD = 2.1$

8.2.3. Diskussion. Die Studien 3 und 4 lieferten bereits wichtige Erkenntnisse zur Lokalisation der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes. Da diese Erhebungen allerdings im Rahmen einer Online-Studie stattfanden, wurde im Kapitel 7.4 die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Realität diskutiert. Aus diesem Grund untersuchte die Vorstudie der Studie 5 zunächst die Fragestellung, inwiefern sich die in den vorherigen Studien bestimmten Schwellenwerte im realistischeren Szenario einer Fahrsimulation bestätigen lassen und somit diese Online-Methode eine valide, aufwandsreduzierte Alternative darstellt. Zur Konkretisierung der Fragestellung wurden Hypothesen abgeleitet, die in der Vorstudie geprüft wurden. Eine Hypothese H1 lautete:

H1: Automatisierte Trajektorien, die unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessenen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Fahrsimulator in den Fahrszenarien der Studie 4 als angemessen bzw. angenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben keinen Eingriffswunsch.

Die Ergebnisse der Vorstudie der Studie 5 konnten diese Hypothese H1 bestätigen. Der Lateralversatz von 0.3 m (als Trajektorie, die unter dem in Studie 4 bestimmten Schwellenwert liegt) wurde in den zwei Szenarien der Studie 4 (Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m) bei bzw. nach Erscheinen des Gegenverkehrs vom Großteil der Versuchspersonen als angemessen und angenehm, d. h. unkritisch, bewertet. Es gab keinen bzw. nur einen geringen Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung (s. Tabelle 16). Da der Zeitpunkt vor Erscheinen des Gegenverkehrs darüber hinaus dem Szenario der Studie 4 ohne Gegenverkehr entsprach und auch hier die Fahrt als angemessen bzw. angenehm bewertet wurde bzw. es keinen Eingriffswunsch gab, kann auch dieses Ergebnis als eine Bestätigung der Hypothese H1 angesehen werden (s. Tabelle 16).

Ausgehend von den Überlegungen der Studie 4, dass sich die subjektive Fahrleistungsbewertung bzw. der Schwellenwert einer subjektiv angemessenen Fahrleistung verändert, sobald der Gegenverkehr die Fahrbahnmitte überschreitet (s. Kapitel 7.4), wurde zur Erweiterung des Wissens zur Situationsabhängigkeit der Schwellenwerte die folgende Hypothese H2 geprüft:

H2: Automatisierte Trajektorien, die in Fahrszenarien, in denen der Gegenverkehr im eigenen Fahrstreifen fährt, noch als angemessen bewertet werden, werden in Szenarien, in denen der Gegenverkehr die Fahrbahnmitte überschreitet, als nicht angemessen bzw. unangenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben einen Eingriffswunsch.

Auch diese Hypothese konnte gemäß den Ergebnissen der Vorstudie bestätigt werden (s. Tabelle 16). Im zusätzlichen Szenario Abstand -0.15 m fiel die Bewertung bei Erscheinen bzw. nach Passieren des Gegenverkehrs deutlich negativer aus. Der Großteil der Versuchspersonen bewertete den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs als eher nicht angemessen und unangenehm bzw. kritisch. Es wurde verstärkt der Wunsch nach einem Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung geäußert. Als solches kann in diesem Szenario das Erscheinen des Gegenverkehrs als Ereignis verstanden werden, bei

dem der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung überschritten wird.

Bezogen auf die Fragestellung der Vorstudie kann anhand der Ergebnisse zusammengefasst werden, dass die Ergebnisse der Online-Studien der Dissertation im Vergleich zu einer statischen Fahrsimulation tatsächlich valide Schlussfolgerungen zulassen und unter Verwendung einer aufwendigeren Fahrsimulation in diesen Studien vergleichbare Ergebnisse zu erwarten gewesen wären. Die Erkenntnisse zum Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) können somit bestätigt werden. Dies betrifft zum einen die Faktorenstruktur des Konzepts der subjektiven Fahrleistungsbewertung (Studie 2) und zum anderen die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes (Studien 3 und 4). Im Sinne einer kritischen Reflexion ergibt sich dennoch die Frage, inwiefern eine statische Fahrsimulation ausreichend Praxisnähe bietet. Eine Verifikation im Realfahrzeug erscheint als relevant, um diesem möglichen weiteren Kritikpunkt entgegenzutreten zu können.

8.3. Hauptstudie

In Nachfolge zur Vorstudie, die sich mit der ersten Fragestellung der Studie 5 (konkretisiert in H1 und H2) beschäftigte, untersuchte die Hauptstudie die zweite Fragestellung (konkretisiert in H3 und H4). Es wurde überprüft, ob die Schwellenwerte bzw. deren Überschreiten im Kontext des automatisierten Fahrens eine Handlungsrelevanz im Sinne der Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen besitzen und somit neben einer reinen Komfortrelevanz auch ein Sicherheitsaspekt möglicher kritischer Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung diskutiert werden muss (drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3).

8.3.1. Methode. Im Rahmen der Hauptstudie absolvierten die Versuchspersonen zur Untersuchung der Handlungsrelevanz der subjektiven Fahrleistungsschwellen eine automatisierte Fahrt im Fahrsimulator bei zusätzlicher Bearbeitung einer FFT. In dieser Fahrt wurden aufbauend auf der Vorstudie verschiedene Gegenverkehrsszenarien implementiert. Im Folgenden sind das Material, das Design, der Ablauf sowie die Stichprobe beschrieben.

8.3.1.1. Material.

8.3.1.1.1. *Fahrsimulator und Fahrscenarien.* Die Hauptstudie der Studie 5 wurde, wie auch die Vorstudie, im statischen Fahrsimulator des ISAC (s. Kapitel 8.2.1.1.1) durchgeführt. Erneut fand die hard- und softwareseitigen Vorbereitungen, die technische Versuchsbegleitung sowie Unterstützung in der Datenaufbereitung durch das ISAC statt. Es wurde das gleiche grundlegende Fahrscenario und vier Gegenverkehrsszenarien dargestellt. Es wurden die drei Gegenverkehrsszenarien der Vorstudie (Abstand 0.85 m / 0.35 m / -0.15 m, s. Abbildung 30) realisiert, wobei die Szenarien Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m gemäß den Ergebnissen der Vorstudie als unkritisch, ohne Auslösung einer Handlungsrelevanz klassifiziert wurden. Das Szenario Abstand -0.15 m wurde als kritisch eingestuft und eine Handlungsrelevanz erwartet (s. Kapitel 8.2.3). Zusätzlich wurde das Szenario Abstand -0.15 m + Baken implementiert. Hier überschritt der Gegenverkehr erneut um 0.15 m die Straßenmitte. Zusätzlich waren Warnbaken am rechten Rand des Ego-Fahrstreifens platziert, die einen Abstand von 0.70 m zum Fahrbahnrand hatten (s. Abbildung 31). Da im Vergleich zum Szenario Abstand -0.15 m nochmals der zur Verfügung stehende Platz eingeschränkt wurde, wurde auch dieses Szenario als kritisch eingestuft. Abbildung 32 zeigt alle vier Gegenverkehrsszenarien.

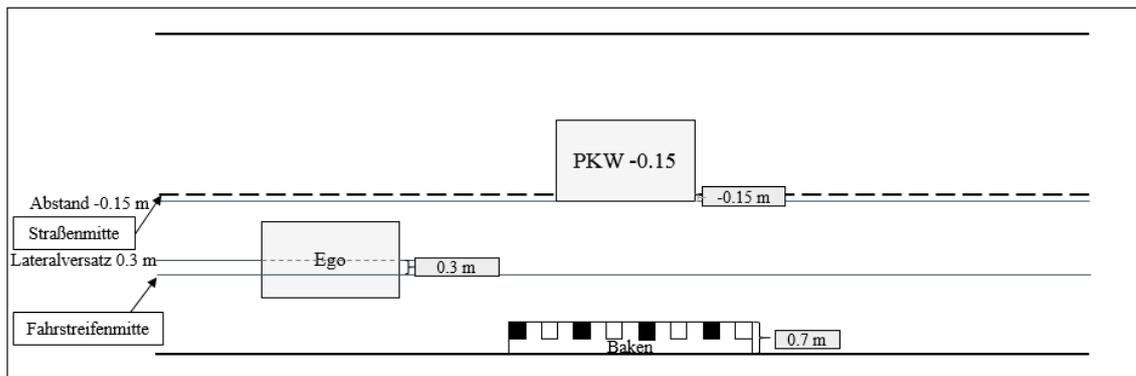


Abbildung 31. Schematische Darstellung des Gegenverkehrsszenarios Abstand -0.15 m + Baken in der Hauptstudie der Studie 5

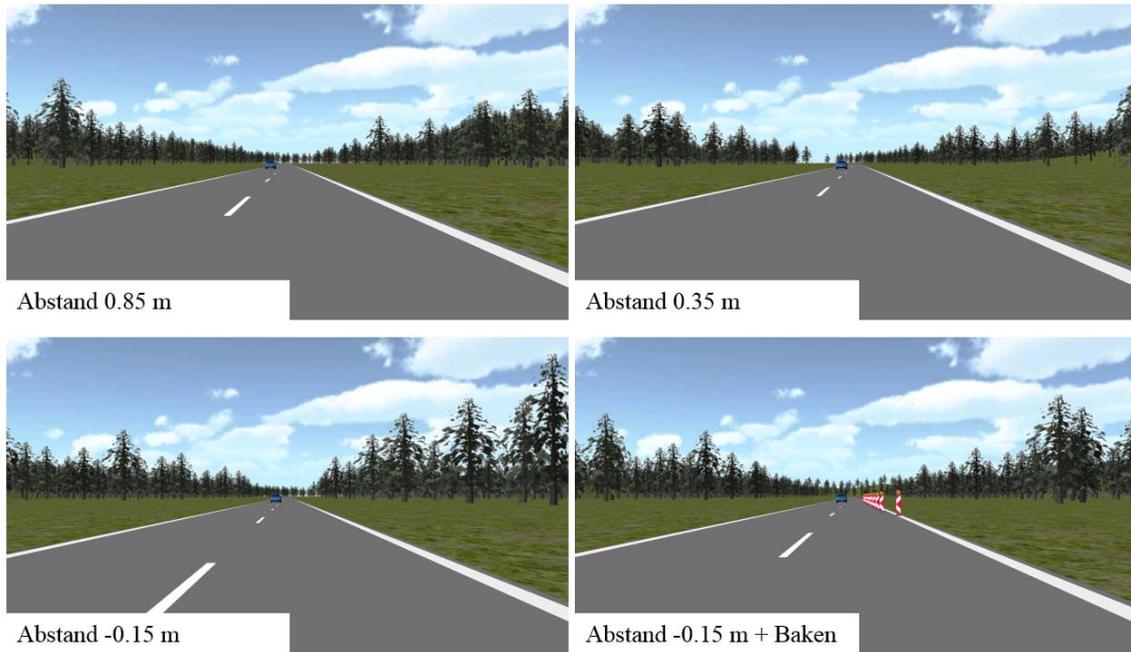


Abbildung 32. Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5 im Fahrsimulator des ISAC (Bildquelle: ISAC).

Anmerkung. Die Bezeichnung „Abstand“ bezieht sich auf den Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte.

8.3.1.1.2. *Automatisiertes System.* Es wurde dasselbe automatisierte System wie in der Vorstudie genutzt (s. Kapitel 8.2.1.1.2). Es wurde um die Spezifikation erweitert, dass es Hindernissen auf der Fahrbahn (z. B. Baustellen oder entgegenkommenden Fahrzeugen) nicht selbstständig ausweichen kann. Aufgrund dessen bestand die Anforderung an die Versuchspersonen, jederzeit übernahmebereit zu sein. Bei Erscheinen des Gegenverkehrs (4.4 s vor Passieren des Gegenverkehrs, s. Kapitel 8.2.1.1.1) gab das System einen Hinweiston. Dieser Ton war nicht als zwingende Übernahmeaufforderung zu verstehen, sondern diente lediglich der Information. Es lag im Ermessen der Versuchspersonen, je nach subjektiver Wahrnehmung in die automatisierte Fahrzeugführung einzugreifen. Die Deaktivierung des Systems konnte über eine erneute Betätigung der Lichthupe erfolgen. Alternativ konnte das System über Lenkrad- oder Pedalbetätigungen übersteuert werden. Bei aktiver Automation fuhr das Ego-Fahrzeug mit einem konstanten Lateralversatz von 0.3 m nach links (bezogen auf die Mitte des Ego-Fahrzeugs). Dieser Wert wurde aus der Vorstudie abgeleitet. Es wurde angenommen, dass bei einem solchen Lateralversatz in unkritischen Situationen (d. h. bei keinem Gegenverkehr und bei den Gegenverkehrsszenarien Abstand 0.85 m und 0.35 m) keine Handlungsrelevanz erzeugt wird, wohl aber in kritischen (d. h. Gegenverkehrsszenarien Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) (s. Kapitel 8.2.3). Insgesamt bestand in keinem

der Szenarien bei aktiver Automation ein objektives Unfallrisiko (d. h. mit dem Lateralversatz von 0.3 m würde es in keinem der Szenarien zu einer Kollision mit dem Gegenverkehr oder den Baken kommen).

8.3.1.1.3. *FFT*. Zur Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen im Mehrfachaufgabenkontext bearbeiteten die Versuchspersonen im Verlauf der automatisierten Fahrt zu bestimmten Zeiten eine FFT. In Anlehnung an Studie 1 wurde erneut die SuRT (Surrogate Reference Task, s. Kapitel 4.2.1.4) genutzt. Das Größenverhältnis von Zielreiz zu Distraktoren war 150:125. Die Darstellung der Aufgabe erfolgte im aktuellen Versuch über ein 7" LCD (Faytech), welches auf Höhe des Lenkrads oberhalb der Mittelkonsole montiert war. Zur Aufgabensteuerung wurde erneut ein Nummernblock (Keypad ID0120, LogiLink) genutzt, der auf der Mittelkonsole platziert wurde.

8.3.1.1.4. *Fragebögen*. Die von den Versuchspersonen erlebten Gegenverkehrsszenarien wurden über diverse Subjektivitems in paper-pencil Befragungen evaluiert. Zu Beginn wurde als Kontrollfrage erfasst, inwiefern das entgegenkommende Fahrzeug wahrgenommen wurde. War dies nicht der Fall, schlossen sich zwei Fragen zur Bewertung der gesamten Fahrt an, die aus Studie 4 bzw. der Vorstudie entnommen wurden (s. Kapitel 7.2.1). Es wurden die Angemessenheit der automatisierten Fahrt im Hinblick auf die Position des Ego-Fahrzeugs auf der Straße („angemessen“/„nicht angemessen“) sowie die Wahrnehmung des Komforts bzw. der Sicherheit über die Komfort-Sicherheits-Skala erfasst (s. Abbildung 24). Für den Fall, dass die Versuchspersonen in der Kontrollfrage angaben, das entgegenkommende Fahrzeug wahrgenommen zu haben, wurden diese zwei Fragen nicht auf die gesamte Fahrt, sondern auf die zwei Zeiträume vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. ohne Gegenverkehr) und ab Erscheinen des Gegenverkehrs bezogen. Der Zeitraum vor Erscheinen des Gegenverkehrs wurde zur Kontrolle des Versuchsdesigns abgefragt. Zum einen sollten die Fahrleistungsschwellen in einem unkritischen Fahrszenario ohne Gegenverkehr überprüft werden. Zum anderen sollten potenzielle Wahrnehmungsunterschiede zwischen den Gegenverkehrsszenarien detektiert werden. Da sich die Szenarien vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. ohne Gegenverkehr) nicht unterschieden, wurden keine Unterschiede in der Subjektivbewertung erwartet. Unterschiedliche Bewertungen könnten somit Rückschlüsse über konfundierende Wahrnehmungsunterschiede geben. Anschließend wurden die Versuchsperso-

nen gebeten, anzugeben, ob, wie und warum sie in die automatisierte Fahrzeugführung (nicht) eingegriffen hätten.

8.3.1.2. Design. Als UV wurde das Gegenverkehrsszenario als Innersubjekt-Faktor (Abstand 0.85 m / Abstand 0.35 m / Abstand -0.15 m / Abstand -0.15 m + Baken) manipuliert. Die Reihenfolge der drei bereits in der Vorstudie genutzten Szenarien wurde zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert. Das vierte, neue Szenario (Abstand -0.15 m + Baken) erlebte jede Versuchsperson zum Ende der Fahrt. Als AV wurden sowohl subjektive als auch objektive Daten herangezogen. Die Subjektivdaten bestanden aus den Beantwortungen der Subjektivfragebögen. Die Objektivdaten stammten zum einen aus der Fahrsimulation. Es wurde die Lateralposition (bezogen auf die Mitte des Fahrzeugs) und die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs analysiert. Zum anderen beinhalteten die Objektivdaten die FFT-Bearbeitung. Es wurden, wie in Studie 1 (s. Kapitel 4.2.2), die SuRT-Inputs, d. h. die Eingaben auf den Pfeiltasten, ausgewertet.

8.3.1.3. Ablauf. Die Studie fand im Januar 2018 statt und nahm pro Versuchsperson ca. 45 min in Anspruch. Im Anschluss an eine kurze Begrüßung unterzeichnete die Versuchsperson einen Haftungsausschluss sowie eine Datenschutz- und Geheimhaltungsvereinbarung. Es folgte eine sozio-demografische Vorbefragung sowie eine erste Instruktion zum Studienhintergrund mit der Cover-Story, dass es um die Untersuchung ginge, inwiefern eine automatisierte Fahrt als entspannt wahrgenommen würde. Im Anschluss nahmen die Versuchsperson (Fahrersitz) und die Versuchsleitung (Beifahrersitz) im Fahrzeug Platz. Die Versuchsperson stellte den Sitz sowie die Spiegel ein und die Versuchsleitung erklärte das Fahrzeug sowie die automatisierte Fahrfunktion.

Es schloss sich eine dreiminütige Übungsfahrt an, in der es noch keinen Gegenverkehr gab. Diese Fahrt diente der Gewöhnung an das Fahrzeug und den Simulator. Die Versuchsperson fuhr bis sie sich sicher fühlte nicht-automatisiert bei einer Richtgeschwindigkeit von 50 km/h und hatte im Anschluss die Möglichkeit, einige Male das automatisierte System zu (de-) aktivieren. Nach Abschluss der Übungsfahrt erläuterte die Versuchsleitung die SuRT und die Versuchsperson machte sich mit der Aufgabe vertraut.

Anschließend begann die ca. 20-minütige Experimentalfahrt. Die Versuchsperson startete nicht-automatisiert und wurde gebeten, beim Erreichen der Richtgeschwindigkeit von 50 km/h das automatisierte System zu aktivieren. Nach je ca. fünf Minuten erschien eines der vier Gegenverkehrsszenarien. Gemäß dem Studiendesign erfolgten zunächst die drei Szenarien der Vorstudie (Abstand 0.85 m / Abstand 0.35 m / Abstand -0.15 m) und abschließend das Zusatzszenario Abstand -0.15 m + Baken. Parallel zur automatisierten Fahrt bearbeitete die Versuchsperson zu bestimmten Zeitpunkten die SuRT. Die für die Datenauswertung relevanten Zeitpunkte waren jeweils eine Minute vor Erscheinen des Gegenverkehrs bis eine halbe Minute nach Passieren des Gegenverkehrs. Darüber hinaus gab es zusätzliche Dummy-Bearbeitungen der SuRT jeweils zwei bis anderthalb Minuten vor Erscheinen des Gegenverkehrs. Sie hatten den Zweck, bei den Versuchspersonen den Eindruck zu vermeiden, dass jede SuRT-Bearbeitung an das Passieren eines entgegenkommenden Fahrzeugs gekoppelt war. Diese Dummy-Bearbeitungen waren nicht auswertungsrelevant. Zur besseren Verständlichkeit ist dieser zeitliche Ablauf der Experimentalfahrt in Abbildung 33 dargestellt. Im Anschluss an jede auswertungsrelevante SuRT-Bearbeitung (d. h. nach SuRT-Bearbeitungen mit einem Gegenverkehrsszenario) führte die Versuchsleitung die Subjektivebefragung mit der Versuchsperson im Rahmen eines Interviews durch. Somit fand die Befragung immer nach Passieren des Gegenverkehrs statt (auch für die Items, die sich auf den Zeitraum vor Erscheinen des Gegenverkehrs bezogen). Nach der vierten und letzten Subjektivebefragung war der Versuch beendet und die Versuchsperson wurde verabschiedet.

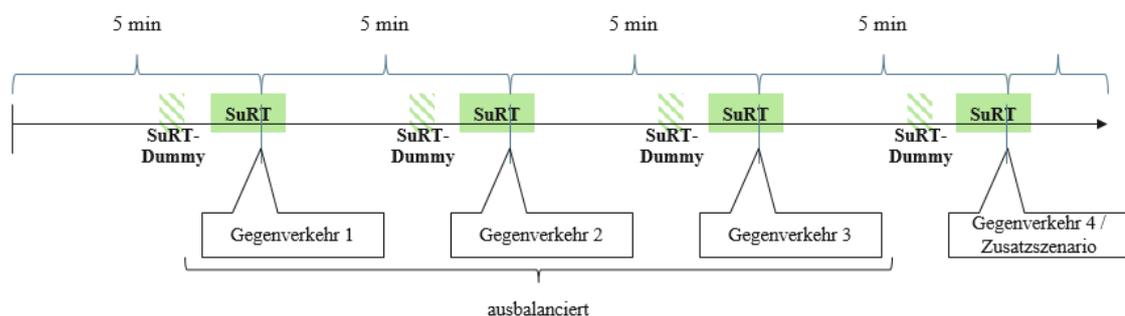


Abbildung 33. Chronologie der Experimentalfahrt der Hauptstudie der Studie 5

8.3.1.4. Stichprobe. Die Versuchspersonenakquise fand über persönlichen Kontakt und die Versuchspersonendatenbank des ika statt. Es nahmen 65 Versuchspersonen an der Studie teil. Da aufgrund technischer Probleme $n = 5$ Teilnehmende von der Aus-

wertung ausgeschlossen werden mussten, bestand die finale Stichprobe aus $N = 60$ ($n = 15$ weiblich) Versuchspersonen. Von dieser Stichprobe hatten 97 % die deutsche Nationalität, die anderen 3 % waren italienisch bzw. deutsch-italienisch. Die Teilnehmenden hatten ein Durchschnittsalter von $M = 36$ Jahren ($SD = 16$) und besaßen im Mittel seit $M = 19$ Jahren ($SD = 16$) ihren Führerschein. Die jährliche Kilometerleistung lag bei $M = 14755$ km ($SD = 10286$). Diese Kilometer verteilten sich zu 44.8 % auf die Autobahn, zu 32.6 % auf die Stadt und zu 22.5 % auf die Landstraße. 80 % der Stichprobe fuhr zumeist mit einem Schaltfahrzeug und 61 % gaben an, Erfahrung mit Assistenzsystemen zu haben. Die am häufigsten genannten Systeme waren Tempomat ($n = 23$), ACC ($n = 17$), Spurhaltesysteme ($n = 16$) sowie Einparkhilfen ($n = 13$). Es lagen keine unkorrigierten Hörbeeinträchtigungen vor. Allerdings besaß $n = 1$ Versuchsperson eine Rot-Grün-Schwäche. Da die korrekte Farbwahrnehmung für den Versuch jedoch nicht zentral war und insofern keine Verzerrungen der Ergebnisse erwartet wurden, wurden die Daten der Versuchsperson ausgewertet. Die Teilnehmenden erhielten keine Incentivierung.

8.3.2. Ergebnisse. Zur Ergebnisauswertung und zur Überprüfung der Hypothesen H3 und H4 fanden verschiedene deskriptive und inferenzstatische Datenanalysen statt. Diese sind im Folgenden berichtet. Zunächst wird auf die subjektiven AV eingegangen. Es wird die Wahrnehmung des Gegenverkehrs und die Angemessenheit der Ego-Trajektorie betrachtet (Kapitel 8.3.2.1). Anschließend folgt die Auswertung der subjektiv berichteten Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung (s. Kapitel 8.3.2.2) sowie die Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala (s. Kapitel 8.3.2.3). Zum Abschluss der Subjektivauswertung werden die offenen Kommentare der Versuchspersonen betrachtet (s. Kapitel 8.3.2.4). Es folgt die Auswertung der Objektivdaten. Zu diesem Zweck wird zunächst die Aufbereitung der Objektivdaten berichtet (s. Kapitel 8.3.2.5). Anschließend folgen die Analysen der SuRT-Aktivität (s. Kapitel 8.3.2.6), der Geschwindigkeit (s. Kapitel 8.3.2.7) und des Lateralversatzes (s. Kapitel 8.3.2.8). Abschließend (s. Kapitel 8.3.2.9) findet ein Vergleich dieser drei Objektivmaße statt.

8.3.2.1. Wahrnehmung des Gegenverkehrs und Angemessenheit der Ego-Trajektorie. Die Versuchspersonen nahmen in jedem Szenario den Gegenverkehr wahr.

Dementsprechend wurden alle folgenden Subjektivfragen separat für die zwei Zeitpunkte vor und ab Erscheinen des Gegenverkehrs beantwortet und analysiert. Abbildung 34 zeigt die prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung in jedem der vier Gegenverkehrsszenarien für die zwei Zeitpunkte vor und ab Erscheinen des Gegenverkehrs. Vor Erscheinen des Gegenverkehrs bewerteten die Versuchspersonen die automatisierte Fahrt im Hinblick auf die Position des eigenen Fahrzeugs auf der Straße in allen Szenarien zu mehr als 90 % als angemessen. Im Sinne der Überprüfung des Versuchsdesigns heißt dieses Ergebnis zum einen, dass ein unkritisches Verkehrsszenario ohne Gegenverkehr als angemessen bewertet wird. Zum anderen wird deutlich, dass es auf deskriptiver Ebene keine Bewertungstendenzen zwischen den verschiedenen Gegenverkehrsszenarien gab. Ab Erscheinen des Gegenverkehrs ergab sich für die beiden unkritischen Szenarien (Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m) ein vergleichbares Ergebnis. Für die beiden kritischen Szenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) zeigte sich ein verändertes Bild und die automatisierte Fahrt wurde nur in ca. 50 % der Fälle als angemessen bewertet.

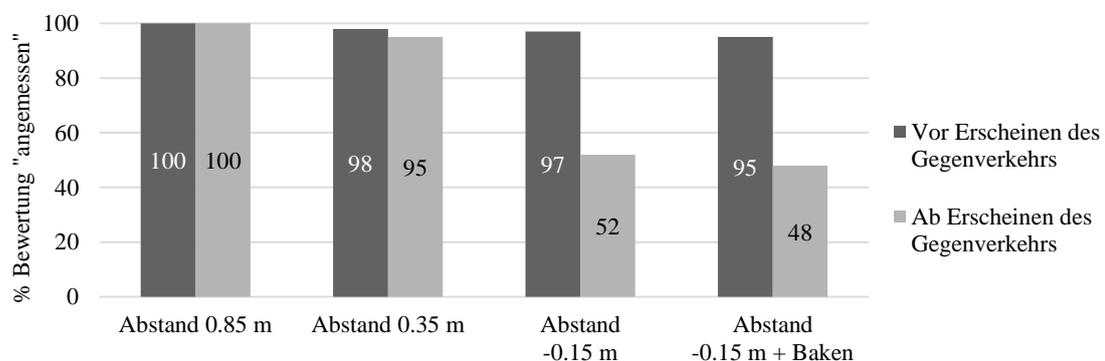


Abbildung 34. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung in den vier Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5

8.3.2.2. Subjektiv berichtete Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung.

Weiterhin wurden die Versuchspersonen gebeten, subjektiv anzugeben, inwiefern sie in die automatisierte Fahrzeugführung eingriffen, als der Gegenverkehr erschien. 2 % der Stichprobe gab in den unkritischen Szenarien Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m einen Eingriff an. In den kritischen Szenarien stieg diese Quote deutlich an (Abstand -0.15 m: 50 %; Abstand -0.15 m + Baken: 63 %). Das Ergebnismuster deckt sich somit mit dem der Angemessenheitsbewertung.

8.3.2.3. Komfort-Sicherheits-Skala. Abbildung 35 beinhaltet die deskriptiven Statistiken der Komfort-Sicherheits-Skala für die vier Gegenverkehrsszenarien und die zwei Zeitpunkte. Vor Erscheinen des Gegenverkehrs fiel die Bewertung in allen vier Szenarien als angenehm aus. Diese Einschätzung veränderte sich für die beiden unkritischen Szenarien (Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m) auch nicht ab Erscheinen des Gegenverkehrs. In den zwei kritischen Szenarien hingegen (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) fiel die Bewertung als unangenehm aus.

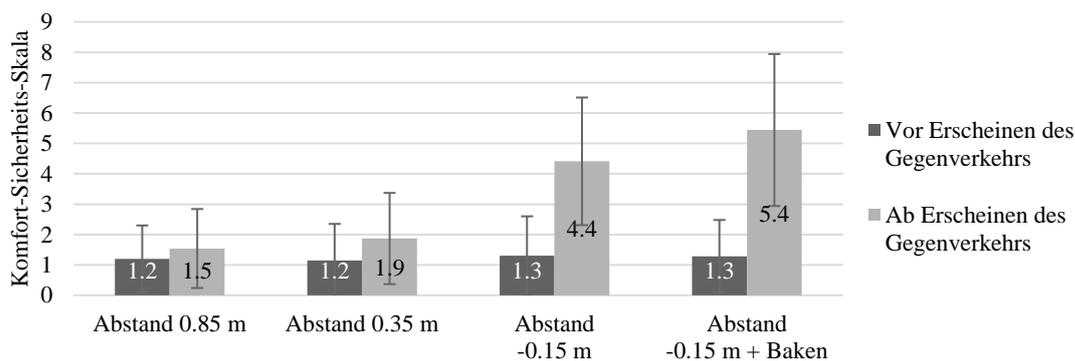


Abbildung 35. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala in den vier Gegenverkehrsszenarien der Hauptstudie der Studie 5

Im Rahmen einer inferenzstatistischen Analyse der Daten wurde eine ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Zeitpunkt (vor Erscheinen des Gegenverkehrs, ab Erscheinen des Gegenverkehrs) und Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m, Abstand 0.35 m, Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Baken) berechnet. Die AV war die Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala. Es ergaben sich signifikante Haupteffekte für den Faktor Zeitpunkt ($F(1, 53) = 143.81, p < .001, \eta^2 = .73$) und Gegenverkehrsszenario ($F(3, 159) = 86.76, p < .001, \eta^2 = .62$) sowie für die Interaktion Zeitpunkt*Gegenverkehrsszenario ($F(3, 159) = 92.18, p < .001, \eta^2 = .64$). Zur detaillierteren Untersuchung der Effekte wurden angeschlossene Bonferroni-korrigierte post-hoc paarweise Vergleiche betrachtet. Diese zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gegenverkehrsszenarien vor Erscheinen des Gegenverkehrs. Folglich schien es keine Bewertungstendenzen zwischen den verschiedenen Gegenverkehrsszenarien zu geben. Ebenso unterschieden sich die zwei unkritischen Gegenverkehrsszenarien nicht ab Erscheinen des Gegenverkehrs. Alle anderen Kombinationen der Gegenverkehrsszenarien unterschieden sich zum Zeitpunkt ab Erscheinen des Gegenverkehrs signifikant

voneinander ($p < .001$). Weiterhin unterschieden sich alle vier Gegenverkehrsszenarien auf der Komfort-Sicherheits-Skala zwischen den zwei Zeitpunkten (Abstand 0.85 m: $p < .05$; alle anderen Szenarien: $p < .001$).

8.3.2.4. Offene Kommentare. Im Rahmen der Subjektivbefragung wurden die Versuchspersonen pro Fahrt zusätzlich gebeten, zu erklären, warum sie (nicht) in die automatisierte Fahrzeugführung eingriffen und wie sie – im Falle eines Eingriffs – reagierten. Die detaillierten Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 27 bis Tabelle 34 (Anhang E) zu finden. Im Szenario Abstand 0.85 m griff der Großteil der Stichprobe ($n = 59$) nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein, da sie sich sicher fühlten bzw. keine Gefahr verspürten ($n = 27$), den Platz als ausreichend einschätzten ($n = 14$), keine Notwendigkeit für einen Eingriff sahen ($n = 14$) oder dem System vertrauten ($n = 44$) (s. Tabelle 28). Ein vergleichbares Bild zeigte sich im anderen unkritischen Szenario Abstand 0.35 m (s. Tabelle 30). Dahingegen griffen im Szenario Abstand -0.15 m genauso viele Versuchspersonen in die Fahrzeugführung ein bzw. nicht ein (jeweils $n = 29$, s. Tabelle 31 und Tabelle 32). Als Gründe für den Eingriff, der zumeist als Lenkbewegung und vereinzelt als Anpassung der Geschwindigkeit beschrieben wurde, nannten die Versuchspersonen ein Fehlverhalten des Gegenverkehrs ($n = 18$), die Gefahr einer Kollision ($n = 6$), nicht ausreichenden Platz ($n = 4$) bzw. Misstrauen gegenüber dem System ($n = 1$). Im Szenario Abstand -0.15 m + Baken gab die Mehrheit der Stichprobe ($n = 35$) an, in die Fahrzeugführung eingegriffen zu haben (s. Tabelle 33). Es wurden sowohl Eingriffe in die Längs- als auch in die Querführung berichtet. Als Begründung für ihr Verhalten nannten die Versuchspersonen vor allem den mangelnden Platz ($n = 26$). Weitere Gründe waren die Gefahr einer Kollision ($n = 6$), ein Fehlverhalten des Gegenverkehrs ($n = 2$) sowie das Misstrauen gegenüber dem System ($n = 1$).

Neben diesen offenen Anmerkungen zu ihrem Eingriffsverhalten, machten einige Teilnehmende weitere Kommentare. So wurde von einigen Versuchspersonen angemerkt, dass sie zwar nicht in die automatisierte Fahrzeugführung eingegriffen hätten, wohl aber die Hände zum Lenkrad geführt hätten, um eingriffsbereit zu sein. Weiterhin wurde von einigen Teilnehmenden angemerkt, dass sie in einer nicht-automatisierten Fahrt selbst eher weiter rechts fahren würden und im Nachgang zum Szenario eventuell doch eingegriffen hätten.

8.3.2.5. Aufbereitung der Objektivdaten. Zusätzlich zu den Fragebogendaten wurden objektive Fahrdaten (Lateralposition und Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs) aufgezeichnet. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die verschiedenen Studien der Dissertation, erfolgte die Datenaufbereitung und Auswertung in vergleichbarer Weise zu Studie 1 (s. Kapitel 4.3.1). Die Analyse der Objektivdaten fand erneut über den Zeitverlauf statt, um den proaktiven Mechanismus der funktionalen Verhaltensanpassungen untersuchen zu können. Die Fahrsimulationssoftware berechnete pro Versuchsperson mittlere Werte der Objektivparameter für zeitliche Intervalle t_i , die eine Länge von 520 ms hatten. D. h., jedes Intervall t_i beinhaltete Fahrsimulationsdaten von 520 ms (ausgehend von der Methodendiskussion der Studie 1 in Kapitel 4.4 war ursprünglich eine Intervalllänge von 500 ms geplant – aufgrund hardwareseitiger Latenzzeiten waren die Intervalle jedoch immer 20 ms länger). Der Hinweiston, der auf das entgegenkommende Fahrzeug aufmerksam machte, diente als Referenzpunkt t_0 für diese Intervalle. Als solches umfasste das Intervall t_{-1} Fahrsimulationsdaten der letzten 520 ms vor dem Hinweiston. Analog umfasste t_{+1} die Daten der ersten 520 ms nach dem Hinweiston. In die Analysen wurden die Daten der Intervalle t_{-8} bis t_{+16} einbezogen. Die SuRT-Aktivität wurde, wie in Studie 1 (s. Kapitel 4.3.1), kontinuierlich aufgezeichnet. Für jedes Intervall t_i wurden deshalb die Anzahl der SuRT-Inputs addiert. Dieses Maß gab dementsprechend an, wie viele SuRT-Inputs die Versuchsperson pro Intervall machte. Abbildung 36 zeigt den intervallskalierten zeitlichen Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignisse bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h.

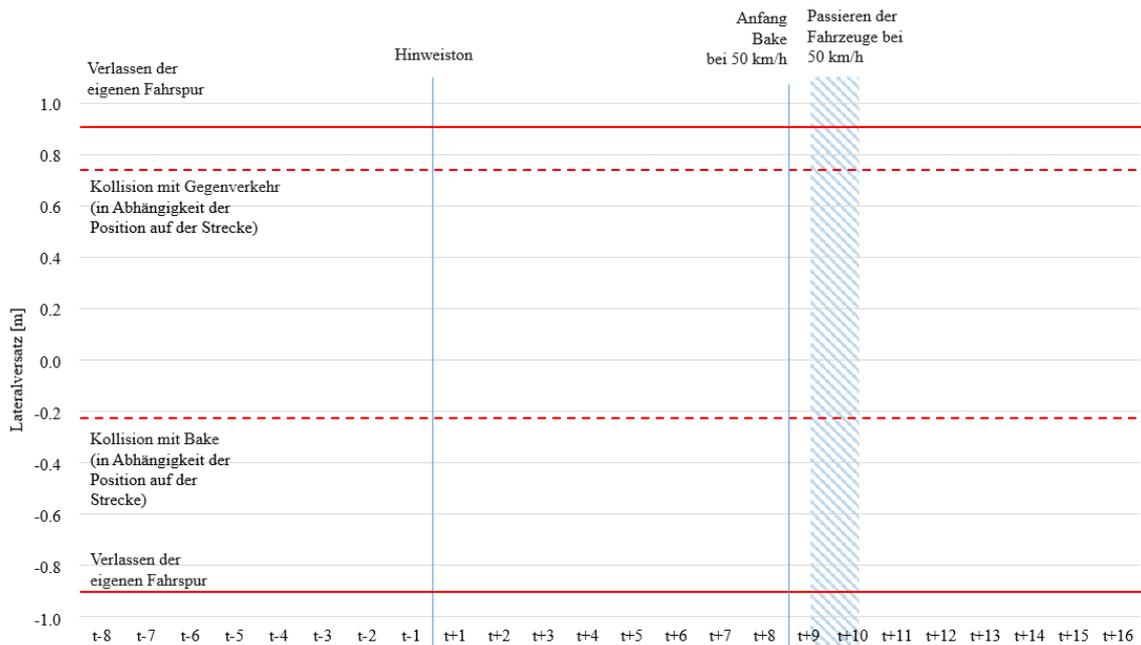


Abbildung 36. Intervallskaliertes zeitliches Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignisse bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h in der Hauptstudie der Studie 5. *Anmerkung.* Das Ende der Baken ist nicht eingezeichnet, da bis einschließlich t_{+16} Baken positioniert waren.

In den Analysen der Objektivdaten wurden verschiedene Gruppen von Fällen miteinander verglichen. Es wurden die Gegenverkehrsszenarios und das Eingriffsverhalten (kein Eingriff vs. Eingriff) unterschieden. Da die Analyse der Subjektivdaten zeigte, dass die Versuchspersonen nach ihrer Angabe vor allem in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarios (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) eingriffen, lag der Fokus der Objektivauswertung (insbesondere für die Fahrdaten) auf diesen zwei Szenarios. In einer vorgelagerten Analyse wurde überprüft, inwiefern die Objektivdaten mit den Subjektiveinschätzungen der Versuchspersonen hinsichtlich ihrer Eingriffe übereinstimmten. Die Analyse bestätigt, dass in den Fällen ohne subjektiv berichteten Eingriff auch keine relevanten Änderungen in den Fahrdaten erkennbar waren. Für Fälle mit subjektiv berichtetem Eingriff ließen sich hingegen klare Geschwindigkeitsveränderungen oder Lenkbewegungen nachweisen. Aufgrund dieser Passung zwischen Objektiv- und Subjektivdaten wurde die Fallklassifizierung in Eingriff/kein Eingriff aus der Subjektivauswertung für die Objektivanalyse übernommen.

8.3.2.6. SuRT-Aktivität. Zur Validierung der SuRT-Daten wurde die Qualität der SuRT-Bearbeitung in einer vorgelagerten Analyse untersucht. Es wurden alle SuRT-Bearbeitungen, d. h. auch die Dummy-Bearbeitungen, betrachtet. Über alle SuRT-

Sequenzen wurden im Mittel $M = 188$ Trials ($SD = 63$) bearbeitet. Die Quote korrekter Trials lag bei 99.4 %. Es kann also geschlossen werden, dass die Versuchspersonen die SuRT mit ausreichender Qualität bearbeiteten und die SuRT-Inputs ein valides Maß der FFT-Bearbeitung sind.

Abbildung 37 zeigt die SuRT-Inputs pro Intervall t_i gemittelt über alle Versuchspersonen für die zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das unkritische Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff.

Deskriptiv nahm die SuRT-Aktivität im unkritischen Szenario (Abstand 0.85 m, kein Eingriff) nach dem Hinweiston ab, sie wurde aber nicht auf null reduziert. Ab t_{+7} , d. h. noch vor Passieren der Fahrzeuge, wurden die Inputs bereits wieder erhöht. In beiden kritischen Szenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) wurden die Bearbeitung nach dem Hinweiston auf bzw. fast auf null reduziert. Im Vergleich zum unkritischen Szenario wurden die Inputs erst später wieder erhöht. Ohne Eingriff steigerten die Versuchspersonen die Aktivität beim Passieren der Fahrzeuge. Bei einem Eingriff konnte keine oder nur eine geringe Steigerung der SuRT-Aktivität nach dem Passieren der Fahrzeuge festgestellt werden. Zusammenfassend unterschied sich die SuRT-Aktivität auf deskriptiver Basis zwischen unkritischen und kritischen Szenarien.

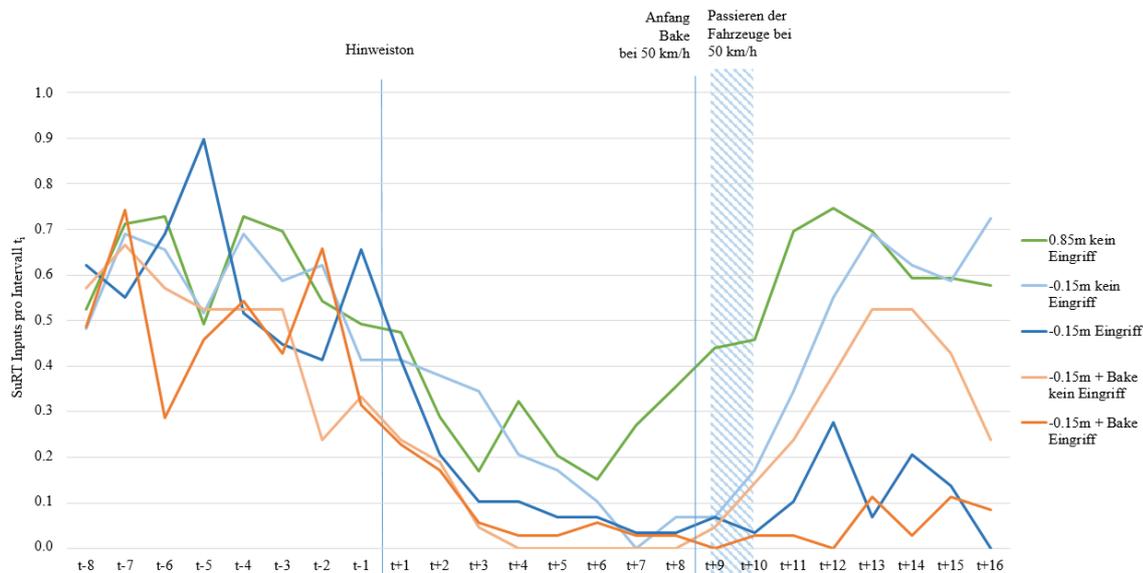


Abbildung 37. SuRT-Inputs in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5. *Anmerkung.* Es wurde das Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff als Vergleichsszenario herangezogen, da es zwischen diesem und dem Szenario Abstand 0.35 m bei keinem Eingriff keine signifikanten Unterschiede in der SuRT-Aktivität gab.

Anschließend fand eine inferenzstatistische Analyse der SuRT-Daten statt. Zur Prüfung, ob sich die beiden kritischen Szenarien voneinander unterschieden, wurde eine univariate ANOVA mit den UV Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Baken), Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) sowie Zeitpunkt (t_{+8} bis t_{+16}) durchgeführt. Die SuRT-Inputs dienten als AV. Es ergaben sich signifikante Haupteffekte für das Gegenverkehrsszenario ($F(1, 2640) = 20.92$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .008$), den Eingriff ($F(1, 2640) = 24.97$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .009$) sowie den Zeitpunkt ($F(23, 2640) = 13.95$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .108$). Ebenfalls wurde die Interaktion Eingriff*Zeitpunkt ($F(23, 2640) = 2.85$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .024$) signifikant. Paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) für diese signifikante Interaktion zeigten signifikante Unterschiede ($p < .05$) zwischen Versuchspersonen mit und ohne Eingriff ab t_{+11} (nach Passieren der Fahrzeuge). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die SuRT-Aktivität in den kritischen Gegenverkehrsszenarien hauptsächlich davon abhing, ob die Versuchspersonen die Fahrzeugführung übernahmen.

Eine weitere univariate ANOVA untersuchte die Unterschiede in der SuRT-Bearbeitung zwischen den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien und dem unkritischen Vergleichsszenario. Als AV dienten das Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m kein Eingriff, Abstand -0.15 m kein Eingriff, Abstand -0.15 m Eingriff, Abstand -0.15 m + Baken kein Eingriff, Abstand -0.15 m + Baken Eingriff) und der Zeitpunkt (t_{+8} bis t_{+16}). Die AV waren erneut die SuRT-Inputs. Beide Haupteffekte (Gegenverkehrsszenario: $F(4, 4032) = 35.81$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .034$; Zeitpunkt: $F(23, 4032) = 14.54$, $p < .077$, $\eta_p^2 = .077$) sowie die Interaktion Gegenverkehrsszenario*Zeitpunkt ($F(92, 4032) = 1.68$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .037$) waren signifikant. Paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) des Faktors Zeitpunkt zeigten für den Vergleich der Zeitpunkte vor und nach dem Hinweiston, dass es eine signifikante Reduktion der SuRT-Inputs ab t_{+2} bzw. t_{+3} gab (z. B. t_{+4} vs. t_{+2} oder t_{-1} vs. t_{+3} , jeweils $p < .01$). D. h., ca. 1-1.5 s nach dem Hinweiston (aber noch vor Passieren der Fahrzeuge) reduzierten die Versuchspersonen die FFT-Aktivität. Weitere paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) wurden für die Interaktion Gegenverkehrsszenario*Zeitpunkt durchgeführt. Sie zeigten, dass sich das unkritische Vergleichsszenario bis auf vereinzelte Vergleiche ab t_{+10} von den beiden kritischen Szenarien unterschied, wenn in diesen eingegriffen wurde ($p < .05$). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen dem unkritischen Szenario und den kritischen, wenn in diesen nicht eingegriffen wurde. Insgesamt konnten die inferenzsta-

tistischen Analysen also nur dann einen Unterschied zwischen unkritischen und kritischen Szenarien feststellen, falls die Versuchspersonen in den kritischen Szenarien die Fahrzeugführung übernahmen.

8.3.2.7. Geschwindigkeit. Als weiterer Objektivparameter wurde die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs analysiert. Abbildung 38 zeigt den zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) mit und ohne Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung.

Wie bei den SuRT-Inputs wurde zur inferenzstatistischen Untersuchung eine univariate ANOVA durchgeführt. Das Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Baken), der Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) sowie der Zeitpunkt (t_{-8} bis t_{+16}) stellten die UV dar. Die Geschwindigkeit war die AV. Wie Tabelle 17 zeigt, wurden alle Haupteffekte und Interaktionen signifikant.

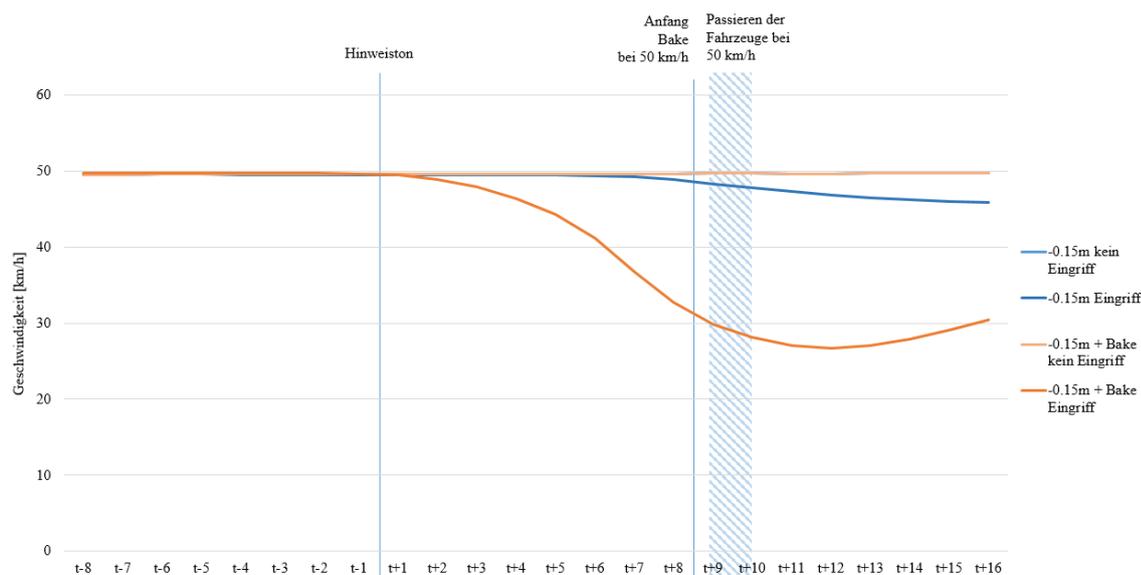


Abbildung 38. Geschwindigkeitsverlauf in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5. *Anmerkung.* Der hellblaue Graph von Abstand -0.15 m kein Eingriff wird vom hellorangeenen Graph Abstand -0.15 m + Baken kein Eingriff überlagert.

Tabelle 17

Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Geschwindigkeit in der Hauptstudie der Studie 5

Effekt	F-Wert	p-Wert	η_p^2
Gegenverkehrsszenario	$F(1, 2640) = 212.00$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .074$
Eingriff	$F(1, 2640) = 338.15$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .114$
Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 16.33$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .125$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff	$F(1, 2640) = 218.00$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .076$
Gegenverkehrsszenario*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 10.28$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .082$
Eingriff*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 16.87$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .128$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 10.29$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .082$

Zur näheren Analyse dieser Effekte wurden verschiedene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) betrachtet. Für das Gegenverkehrsszenario Abstand -0.15 m zeigten diese Vergleiche außer für t_{+15} und t_{+16} ($p < .05$) keine signifikanten Unterschiede zwischen Versuchspersonen mit und ohne Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung. D. h., es fand keine signifikante Geschwindigkeitsreduktion im Falle eines Eingriffs statt. Im Szenario Abstand -0.15 m + Baken unterschieden sich die Geschwindigkeitsverläufe für Versuchspersonen mit bzw. ohne Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung ab t_{+5} ($p < .01$). D. h., im Falle eines Eingriffs reduzierten die Versuchspersonen signifikant die Geschwindigkeit. Im Falle eines Eingriffs in die automatisierte Fahrzeugführung unterschieden sich die beiden Gegenverkehrsszenarien hinsichtlich der AV signifikant ab dem Intervall t_{+5} ($p < .01$). D. h., die Geschwindigkeitsreduktion im Falle eines Eingriffs fand vor allem im Szenario Abstand -0.15 m + Baken statt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs in Abhängigkeit aller drei UV (Gegenverkehrsszenario, Eingriff und Zeitpunkt) unterschiedlich war.

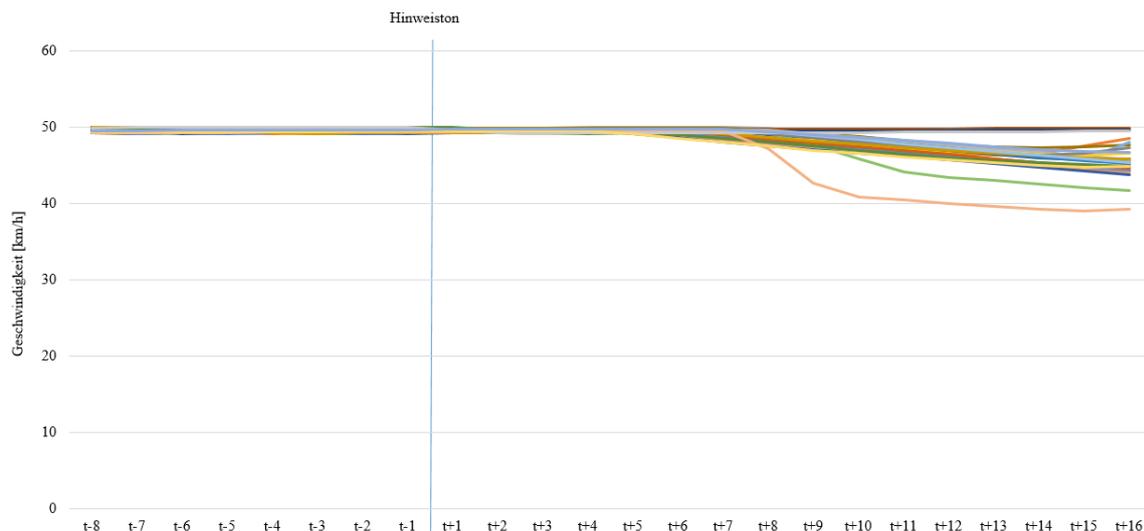


Abbildung 39. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5

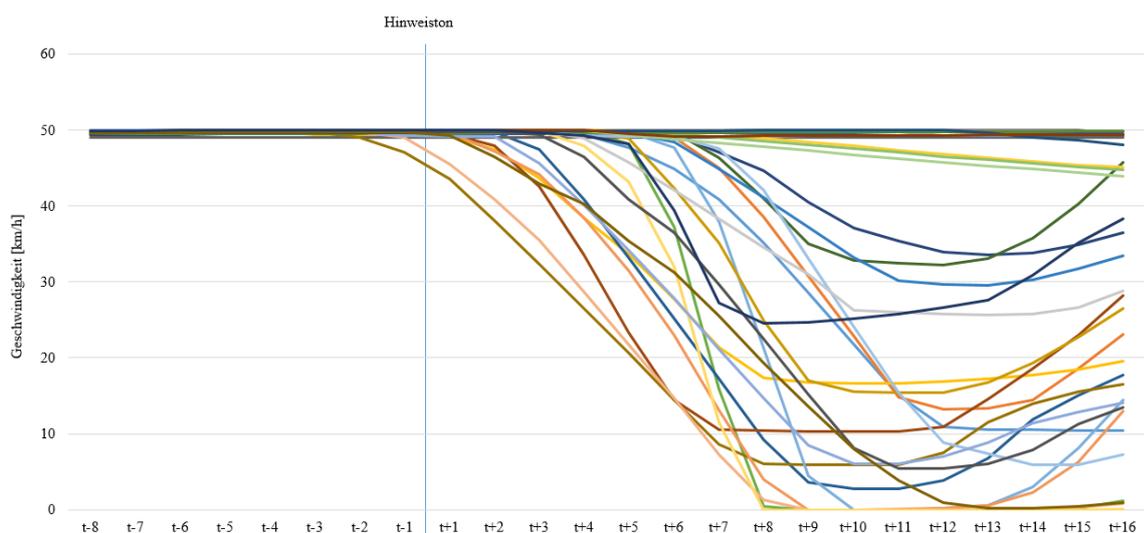


Abbildung 40. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5

Zur Identifikation möglicher nicht optimaler oder sicherheitskritischer Verhaltensmuster wurden neben den mittleren Geschwindigkeitsverläufen zusätzlich die Einzeltrajektorien der Versuchspersonen im Falle eines Eingriffs betrachtet (Abbildung 39 für Abstand -0.15 m und Abbildung 40 für Abstand -0.15 m + Baken). Der Verlauf der einzelnen Trajektorien entspricht den Ergebnissen der zuvor berichteten inferenzstatistischen Analysen. Während es innerhalb des Szenarios Abstand -0.15 m keine starken Reduzierungen der Geschwindigkeit gab, fanden im Szenario Abstand -0.15 m + Baken

im Zeitverlauf Änderungen der Geschwindigkeit statt. Daher wurde dieses letztere Szenario genauer untersucht. Viele Versuchspersonen reduzierten ihre Geschwindigkeit vor den Baken. $N = 6$ Teilnehmende kamen zum vollständigen Stillstand, was in der gegebenen Fahrsituation als nicht optimales Fahrverhalten eingestuft werden kann (z. B. Störung des Verkehrsflusses oder Risiko eines Auffahrunfalls). Neben der reinen Komfortrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung (Bewertung einer Trajektorie als unangenehm/kritisch), gab es also auch einen Sicherheitsaspekt. 10 % der Stichprobe verschlechterte die Fahrsituation durch den Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung.

Diese Geschwindigkeitsanpassungen haben für alle weiteren Analysen der Objektivdaten wichtige Auswirkungen. Eine Verringerung der Geschwindigkeit bedeutete, dass sich die Position des Ego-Fahrzeugs auf der Strecke im zeitlichen Verlauf verschob (z. B. späteres Passieren der Baken im Vergleich zum in Abbildung 36 markierten Zeitpunkt bei 50 km/h).

8.3.2.8. Lateralversatz. Ein dritter Objektivparameter war der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs (bezogen auf die Mitte des Ego-Fahrzeugs). Der Lateralversatz über den Zeitverlauf ist für die zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken) bei Eingriff bzw. bei keinem Eingriff in Abbildung 41 dargestellt.

Wie bei der Geschwindigkeit wurde auch hier im Rahmen der inferenzstatistischen Untersuchung eine univariate ANOVA durchgeführt. Die UV waren erneut das Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Baken), der Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) und der Zeitpunkt (t_8 bis t_{16}). Die AV war der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs. Die Ergebnisse zeigten signifikante Haupteffekte und Interaktionen für alle UV (s. Tabelle 18).

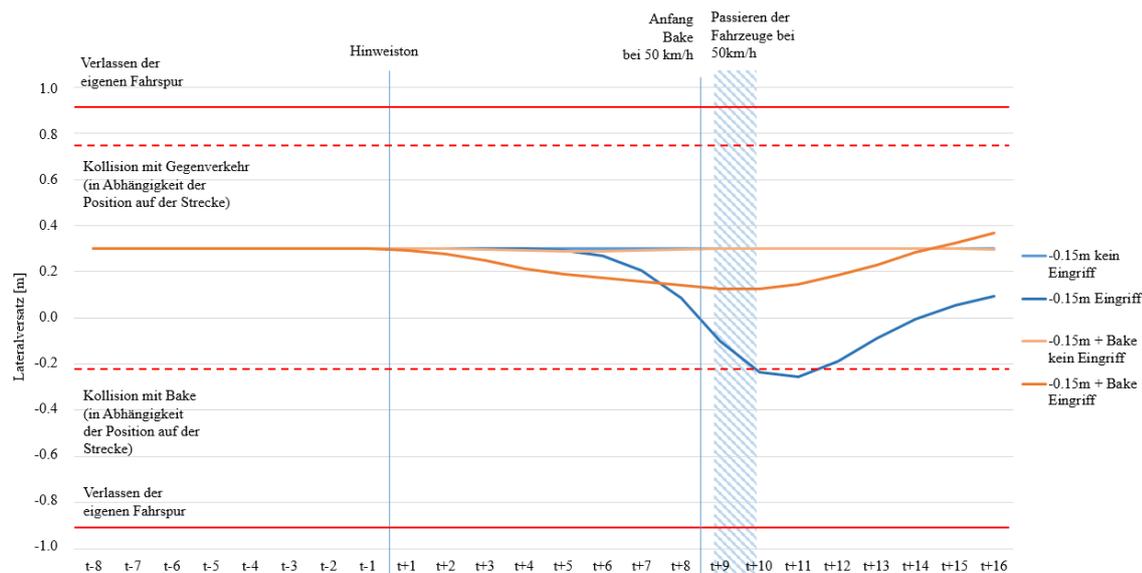


Abbildung 41. Lateralversatz in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Baken) bei keinem Eingriff und Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5

Tabelle 18

Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Lateralversatz in der Hauptstudie der Studie 5

Effekt	F-Wert	p-Wert	η_p^2
Gegenverkehrsszenario	$F(1, 2640) = 61.74$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .023$
Eingriff	$F(1, 2640) = 309.05$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .105$
Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 19.62$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .146$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff	$F(1, 2640) = 67.33$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .025$
Gegenverkehrsszenario*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 9.63$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .077$
Eingriff*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 19.72$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .147$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff*Zeitpunkt	$F(23, 2640) = 9.25$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .075$

Es folgten erneut paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert). Im Szenario Abstand -0.15 m zeigten sich ab t_{+7} ($p < .05$) signifikante Unterschiede zwischen Versuchspersonen mit und ohne Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung. D. h., bei einem Eingriff wichen die Versuchspersonen signifikant nach rechts aus. Diese zwei Gruppen unterschieden sich im anderen Szenario (Abstand -0.15 m + Baken) signifikant zwischen t_{+5} und t_{+12} ($p < .05$). Im Falle eines Eingriffs unterschieden sich die zwei Gegenverkehrsszenarien hinsichtlich des Lateralversatzes signifikant zu t_{+4} und ab t_{+9} ($p < .05$), was zeigt, dass die Versuchspersonen im Szenario ohne Baken signifikant stärker nach rechts auswichen. Zusammengefasst unterschied sich der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs also signifikant in Abhängigkeit des Gegenverkehrsszenarios, des Zeitpunkts und inwiefern in die automatisierte Fahrzeugführung eingegriffen wurde.

Vergleichbar zur Geschwindigkeit wurden auch für die AV Lateralversatz die Einzeltrajektorien der Versuchspersonen mit Eingriff pro Gegenverkehrsszenario betrachtet, um mögliches sicherheitskritisches Verhalten zu identifizieren. Diese sind in Abbildung 42 (Abstand -0.15 m) und Abbildung 43 (Abstand -0.15 m + Baken) dargestellt.

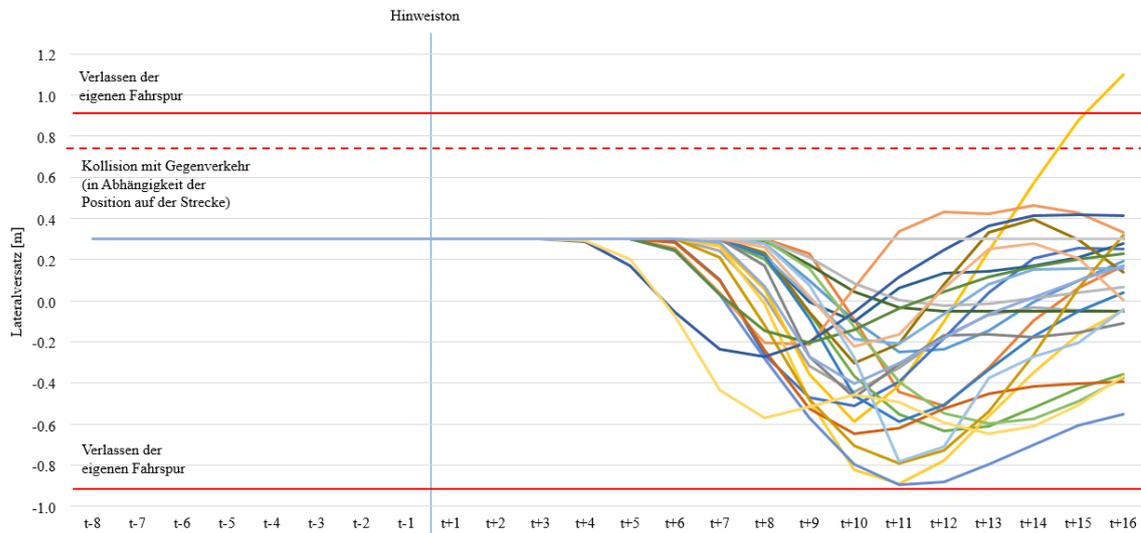


Abbildung 42. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5

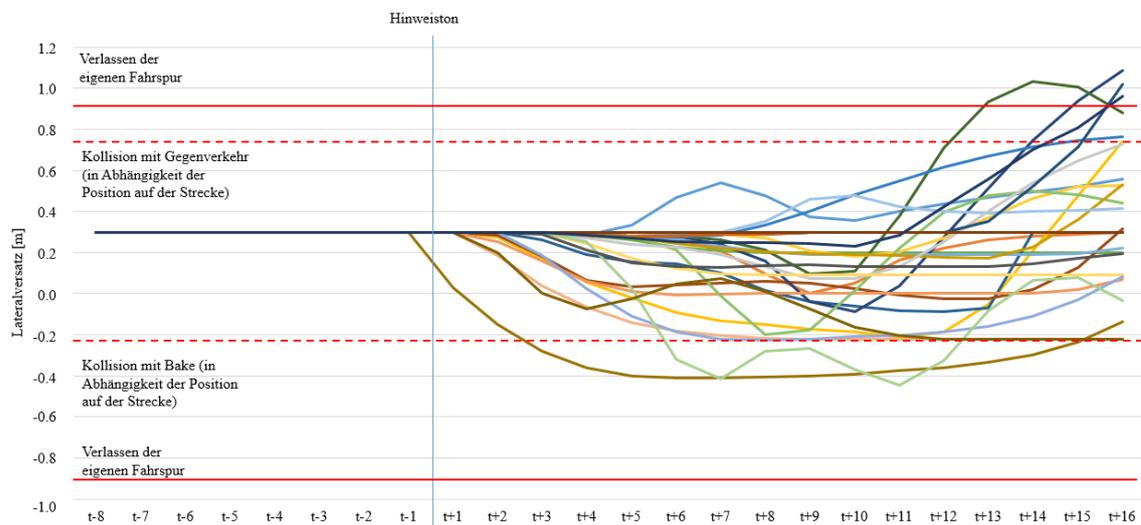


Abbildung 43. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff in der Hauptstudie der Studie 5

Laut diesen Abbildungen verursachten insgesamt $n = 6$ Versuchspersonen Fahrfehler. Dabei wurden alle Kollisionen mit dem Gegenverkehr oder den Baken sowie das

Verlassen des eigenen Fahrstreifens als Fahrfehler definiert. Im Szenario Abstand -0.15 m machte $n = 1$ Versuchsperson einen Fahrfehler, indem sie den eigenen Fahrstreifen verließ. Im Szenario Abstand -0.15 m + Baken verließen $n = 4$ Versuchspersonen den eigenen Fahrstreifen. In keinem der Fälle kam es allerdings zu einer Kollision mit dem Gegenverkehr, da dieser jeweils bereits passiert war. Darüber hinaus kollidierte im Szenario Abstand -0.15 m + Baken $n = 1$ Versuchsperson mit den Baken. Laut Abbildung 43 erreichten $n = 4$ weitere Versuchspersonen die rote Linie, die eine Kollision mit der Bake anzeigt. Da diese Teilnehmenden jedoch zuvor abbremsten, standen bei ihnen noch keine Baken auf der Strecke (s. Kapitel 8.3.2.7). Neben dem reinen Komfortaspekt des Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung schien also auch für den Lateralversatz eine Sicherheitsrelevanz zu bestehen. 10 % der Studienteilnehmenden verschlechterten die Fahrsituation durch ihren Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung.

8.3.2.9. Vergleich der drei Objektivparameter. Zum Abschluss der Analyse der Objektivdaten fand ein deskriptiver Vergleich der drei Objektivparameter statt. Ziel war es, ein Verständnis über den zeitlichen Ablauf funktionaler Verhaltensanpassungen im Sinne von Anpassungen der FFT-Aktivität und Eingriffen in die automatisierte Fahrzeugführung zu erhalten. Zu diesem Zweck sind im Folgenden aus den inferenzstatistischen Analysen der drei Parameter jeweils als relevant erachtete paarweise Vergleiche und deskriptive Befunde zusammengetragen.

Für die SuRT zeigten die paarweisen Vergleiche des Faktors Zeitpunkt, dass über alle Gegenverkehrsszenarien unabhängig davon, ob es zu einem Eingriff in die Fahrzeugführung kam, ab t_{+2} bzw. t_{+3} (d. h. ca. 1-1.5 s nach dem Hinweiston) signifikante Reduktionen in der FFT im Vergleich der Zeitpunkte vor und nach dem Hinweiston auftraten (s. Kapitel 8.3.2.6). Im unkritischen Szenario Abstand 0.85 m fand anschließend auf deskriptiver Basis ab t_{+7} (d. h. noch vor Passieren der Fahrzeuge und ca. 2-2.5 s nach der ersten signifikanten Reduktion) eine Wiedererhöhung der Aktivität statt. In den kritischen Szenarien ohne Eingriff kam es ca. zu t_{+9} (d. h. bei Passieren der Fahrzeuge und ca. 1 s nach dem unkritischen Szenario) zu dieser Erhöhung. In den kritischen Szenarien mit Eingriff ließ sich keine klare Wiederaufnahme der SuRT erkennen.

Für die beiden Fahrparameter zeigten sich signifikante Effekte erst später im Zeitverlauf (s. Kapitel 8.3.2.7 und 8.3.2.8). Im Szenario Abstand -0.15 m fand im Ver-

gleich der Fälle mit ohne Eingriff zwar keine signifikante Anpassung der Geschwindigkeit statt, allerdings wurde zum Zeitpunkt t_{+7} (d. h. ca. 3.6 s nach dem Hinweiston und somit ca. 2-2.5 s nach der ersten signifikanten Reduktion der SuRT) signifikant die Lateralposition adjustiert. Im Szenario Abstand -0.15 m + Baken zeigten sich sowohl für die Geschwindigkeit als auch für den Lateralversatz ab t_{+5} (d. h. ca. 2.6 s nach dem Hinweiston und somit ca. 1-1.5 s nach der ersten signifikanten Reduktion der SuRT) signifikante Unterschiede zwischen Fällen mit und ohne Eingriff.

8.3.3. Diskussion. Während sich die Vorstudie der Studie 5 rein mit der subjektiven Fahrleistungsbewertung als Komponente des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) beschäftigte, untersuchte die Hauptstudie im Rahmen einer zweiten Fragestellung den im Arbeitsmodell theoretisch angenommenen Zusammenhang zwischen der subjektiven Fahrleistungsbewertung und der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen vor dem Hintergrund des automatisierten Fahrens (Hypothese H3 und H4; drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3). Im Rahmen dieses Kapitels wird die Beantwortung der Hypothesen vorgenommen und die Ergebnisse inhaltlich sowie methodisch diskutiert.

Ausgehend von den Annahmen des Arbeitsmodells (Schwalm et al. 2015; Voß & Schwalm, 2015) und den Erkenntnissen der bisherigen Studien ergab sich Hypothese H3 für Fälle, in denen der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung nicht überschritten wird:

H3: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt nicht überschritten wird, greifen Fahrerinnen und Fahrer nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als angemessen und angenehm.

Die Studienergebnisse unterstützen diese Hypothese. Gemäß den Subjektivbewertungen wurde die Ego-Trajektorie in allen Szenarien vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. als zusätzliches Szenario aus Studie 4 ohne Gegenverkehr) als angemessen und sehr angenehm bewertet (s. Abbildung 34 und Abbildung 35). Dies veränderte sich in den zwei unkritischen Gegenverkehrsszenarien Abstand 0.85 m und Abstand 0.35 m auch ab Erscheinen des Gegenverkehrs nicht (s. Abbildung 34 und Abbildung 35). Auf subjektiver Basis wurden darüber hinaus keine Eingriffe in die automatisierte Fahrzeug-

führung berichtet. Diese Eigeneinschätzung deckte sich mit den Objektivparametern der Fahraufgabe, in denen ebenfalls keine Eingriffe nachgewiesen werden konnten. Dennoch zeigte sich in der FFT ca. 1-1.5 s nach dem Hinweiston eine Reduktion der Aktivität. Eine Wiederaufnahme der Aktivität geschah anschließend noch vor Passieren der Fahrzeuge (s. Abbildung 37). Die Bedeutung dieser Befunde für die funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) wird im Folgenden zusammen mit den Ergebnissen der Hypothese H4 diskutiert.

Komplementär zur Hypothese H3 beschäftigte sich Hypothese H4 mit dem Fall, dass der Schwellenwert der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes überschritten wurde:

H4: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt überschritten wird, reduzieren Fahrerinnen und Fahrer proaktiv die FFT und greifen in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als nicht angemessen und unangenehm.

Im Rahmen der Studie wurde dieses Überschreiten des Schwellenwerts über das Erscheinen des Gegenverkehrs, der über die Fahrbahnmitte fuhr (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Baken), operationalisiert. Die Studienergebnisse bekräftigten die Hypothese H4. In den genannten zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien wurde die Ego-Trajektorie ab Erscheinen des Gegenverkehrs subjektiv als unangenehm und von ca. 50 % der Versuchspersonen als unangemessen bewertet (s. Abbildung 34 und Abbildung 35). Ca. die Hälfte der Stichprobe gab darüber hinaus an, in die automatisierte Fahrzeugführung eingegriffen zu haben. Es wurden sowohl Lenk- als auch Bremsengriffe berichtet. An dieser Stelle sei, wie bereits in den Studien 3 und 4, auf die scheinbar erforderliche Unterscheidung subjektiver und objektiver Schwellenwerte in der Fahrleistung hinzuweisen. In keinem der Szenarien war objektiv ein Unfallrisiko vorhanden, was aus technischer Sicht einen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung erforderlich gemacht hätte.

Die objektiven Messdaten unterstützten und erweiterten diese Schlussfolgerungen. Hinsichtlich des Lateralversatzes des Ego-Fahrzeugs konnten für die Versuchspersonen, die in die automatisierte Fahrzeugführung eingriffen, signifikante Änderungen in der Lateralposition ca. eine (Abstand -0.15 m) bzw. zwei (Abstand -0.15 m + Baken) Sekunden vor Passieren des Gegenverkehrs festgestellt werden. Zum Zeitpunkt des Pas-

sierens der Fahrzeuge unterschied sich die Lateralposition des Ego-Fahrzeugs dabei signifikant zwischen den zwei kritischen Szenarien. Mit Baken am rechten Fahrbahnrand wurde weniger stark ausgewichen (s. Abbildung 41). Dabei kam es insgesamt bei 10 % der Versuchspersonen zu Fahrfehlern hinsichtlich der Querregelung (Verlassen des eigenen Fahrstreifens oder Kollision mit den Baken). Zusätzlich zum Lateralversatz konnten auch Anpassungen in der Geschwindigkeit festgestellt werden. Im Mittel kam es im Szenario Abstand -0.15 m + Baken 2.6 s nach dem Hinweiston zu einer signifikanten Geschwindigkeitsreduktion. Dabei kam ein Teil der Versuchspersonen (10 %) zum vollständigen Stillstand, was in der gegebenen Fahrsituation als nicht optimales Fahrverhalten eingestuft wurde. Für das Szenario Abstand -0.15 m wurden keine signifikanten Geschwindigkeitsreduktionen festgestellt.

Ein dritter Objektivparameter, der untersucht wurde, war die FFT-Aktivität. Hier zeigte sich, wie auch bei den in Hypothese H3 berichteten unkritischen Szenarien, ein proaktiver Handlungsmechanismus. Nach dem Hinweiston reduzierten die Fahrerinnen und Fahrer auch in den kritischen Szenarien zunächst die FFT-Aktivität (s. Abbildung 37). In diesen Szenarien unterschied sich die FFT-Aktivität im weiteren Zeitverlauf allerdings in Abhängigkeit des Übernahmeverhaltens. Bei keinem Eingriff fand eine Wiederaufnahme der FFT statt, sobald die Kritikalität der Situation abnahm (d. h. nach Passieren der Fahrzeuge). Bei einem Eingriff konnten keine bzw. nur geringe Erhöhungen der FFT festgestellt werden.

Zusammen mit den Ergebnissen der Hypothese H3 sprechen diese Ergebnisse für das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) und den darin angenommenen theoretischen Zusammenhang zwischen der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung und der Auslösung kompensativer Handlungen im Kontext des automatisierten Fahrens. Im Sinne der Überlegungen von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) schienen Fahrerinnen und Fahrer in allen Szenarien nach dem Hinweiston zunächst über die Pfade 1 und 3 des Modells kognitive Ressourcen freizugeben (Reduktion der FFT), die zur Einschätzung der Fahrsituation und potenziell zur Lösung der Fahraufgabe genutzt werden konnten. Dieser Prozess der Ressourcenfreigabe nahm im vorliegenden Studiendesign ca. 1-1.5 s in Anspruch.

Anschließend zeigten sich auf deskriptiver und teils auf inferenzstatistischer Ebene im Sinne einer Handlungskaskade drei mögliche Zustände des supervisory controllers. In unkritischen Szenarien detektierte der supervisory controller keine Diskre-

panz zwischen den Zielwerten in der Fahrleistung und der aktuellen Trajektorienwahl. Die Auslösung einer kompensativen Handlung (d. h. ein Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung) war nicht von Nöten und die freigegebenen Ressourcen konnten zur Aufrechterhaltung eines mittleren Arousallevels wieder für die FFT genutzt werden (erster Zustand des supervisory controllers: klarer Nicht-Eingriff). Die Auslösung dieses Handlungsschrittes nahm weitere ca. 2-2.5 s in Anspruch. In den kritischen Szenarien kam es in ca. 50 % der Fälle ebenfalls zu keinem Eingriff. Allerdings blieb die FFT-Aktivität hier bis zum Passieren der Fahrzeuge auf einem reduzierten Level. Der supervisory controller hielt in diesen Fällen kognitive Ressourcen für einen gegebenenfalls doch noch erforderlich werdenden Eingriff zur Verfügung (zweiter Zustand des supervisory controllers: „Hab-Acht“-Stellung). In den anderen ca. 50 % der Fälle der kritischen Szenarien detektierte der supervisory controller hingegen eine Diskrepanz zwischen den Ist- und Zielwerten in der Fahrleistung. Über Verwendung der freigegebenen Ressourcen wurden kompensative Handlungen über die Pfade 1 und 3 eingeleitet. Fahrerinnen und Fahrer griffen in die Fahrzeugführung ein (dritter Zustand des supervisory controllers: klarer Eingriff). Diese Handlungsoption nahm im Vergleich zum ersten Zustand des supervisory controllers eine ähnliche Zeitspanne in Anspruch (Abstand -0.15 m: 2-2.5 s und Abstand -0.15 m + Baken: 1-1.5 s). Die konkrete Ausprägung der kompensativen Handlungen (Lenken vs. Bremsen) schien dabei situationsabhängig zu sein. Da somit die kognitiven Ressourcen für die Ausübung der Fahraufgabe benötigt wurden, konnte die FFT nicht wieder erhöht werden, da andernfalls ein aversiv erfahrenes, zu hohes Arousallevel resultiert wäre.

In Fortführung zu Studie 1 (s. Kapitel 4.4) ließ sich somit empirischer Nachweis für die funktionalen Verhaltensanpassungen gemäß Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) im Kontext des automatisierten Fahrens erbringen. Es konnte gezeigt werden, dass das regulative Fahrerverhalten im automatisierten Fahren nicht nur in Abhängigkeit der Situationswahrnehmung, sondern auch in Abhängigkeit der subjektiven Fahrleistungsbewertung auftreten kann (drittes offenes Forschungsfeld, s. Kapitel 3.1.3). Es konnte im Sinne der Überlegungen von Voß und Schwalm (2015) die Handlungskaskade des supervisory controllers (s. Kapitel 2.6.3 und Abbildung 7) empirisch unterstützt und mit einer zeitlichen Komponente versehen werden.

Neben der theoriebasierten Diskussion der funktionalen Verhaltensanpassungen erlauben die Ergebnisse der Hauptstudie der Studie 5 darüber hinaus auch Schlussfolge-

rungen hinsichtlich der Auslegung automatisierter Systeme. Es zeigte sich, dass der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung bzw. dessen Überschreiten nicht nur eine Komfortrelevanz (negative Bewertung der automatisierten Fahrt), sondern auch eine Sicherheitsrelevanz hat. Die Hälfte der Fahrerinnen und Fahrer griff in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Teilweise waren diese Eingriffe dabei entweder nicht optimal bzw. sogar sicherheitskritisch. Die funktionalen Verhaltensanpassungen (FFT-Reduktion zur Freigabe kognitiver Ressourcen für das Lösen der Fahraufgabe) schienen in diesen Fällen nicht vollumfänglich zu greifen. Dies könnte in den von Voß und Schwalm (2015) gemachten Überlegungen (s. Kapitel 2.6.3) den möglichen Fall eines unzureichenden Situationsbewusstseins bzw. einer fahrerseitigen Überlastung (Schritt d in Abbildung 7) widerspiegeln. Die Fahrerinnen und Fahrer lösten die Fahrsituation schlechter, als dass es das automatisierte System gemacht hätte. Es kam also zu einer Art Überkompensation für die jeweilige Fahrsituation (zu extreme Eingriffe). An dieser Stelle ist deshalb zu diskutieren, ob die derzeit gesetzlich geregelte Möglichkeit von Fahrerinnen und Fahrern, jederzeit in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen zu können (SAE International, 2018), in solchen Fällen nicht ein neues, eigenes Risiko erzeugt. Zur Vermeidung solcher sicherheitskritischen Manöver erscheinen die in Kapitel 8.1 eingeführten adaptiven Mechanismen in der Trajektorienplanung deshalb als sinnvoll. Diese könnten eine Steigerung des fahrerseitigen Komfort- und Sicherheitsempfindens ermöglichen und somit sicherheitskritische Übernahmen vermeiden. Idealerweise sollte die Trajektorie ständig dem Fahrszenario angepasst werden, um dauerhaft in einem subjektiv akzeptierten Bereich zu verbleiben. Insbesondere sollte ein automatisiertes System proaktiv, d. h. bevor es zu einer negativen Fahrleistungsbeurteilung und daran angeschlossenen Eingriffen durch Fahrerinnen und Fahrer kommt, handeln. Wenn möglich, sollte die automatisierte Fahrfunktion das Manöver zur Anpassung dabei so implementieren, wie es Fahrerinnen und Fahrer in der gegebenen Situation gemacht hätten. Im vorliegenden Versuchsaufbau wäre dies eine Bremsung in einer Engstelle und ein Ausweichen ohne Geschwindigkeitsreduktion bei keinem zusätzlichen Hindernis. Alternativ wäre es denkbar, den Fahrerinnen und Fahrern mitzuteilen, dass das System in der Lage ist die Fahraufgabe sicher zu lösen (z. B. ein sicheres Passieren zwischen Gegenverkehr und Baken). Auch dies könnte sicherheitskritische Eingriffe durch Fahrerinnen und Fahrer aufgrund eines mangelnden Systemvertrauens bzw. einer Unsicherheit über die Systemfähigkeiten vermeiden. Drittens kann auch die FFT-

Aktivität für die Planung adaptiver Mechanismen genutzt werden. Da sich die FFT-Aktivität zwischen unkritischen und kritischen Situationen mit Eingriff unterschied (Wiedererhöhung bzw. keine Wiedererhöhung), könnte eine ausbleibende Wiederaufnahme der FFT als proaktiver Indikator für die notwendige Aktivierung adaptiver Mechanismen gesehen werden.

Insgesamt bietet die Hauptstudie der Studie 5 somit eine breite Basis für sowohl die theoriebasierte Diskussion der funktionalen Verhaltensanpassungen als auch für die Ableitung möglicher Gestaltungsempfehlungen für automatisierte Systeme. Trotzdem lassen sich in einer methodischen Reflexion einige Studienaspekte identifizieren, die einer kritischen Nachbetrachtung bedürfen. Erstens ist zu diskutieren, ob die möglichen Unterschiede zwischen unkritischen und kritischen Szenarien auf Wahrnehmungsveränderungen im Fahrtverlauf zurückzuführen waren. Möglicherweise veränderte sich die Wahrnehmung der Ego-Trajektorie bzw. des Ego-Lateralversatzes über den Zeitverlauf. Die Erfassung der subjektiven Fahrleistungsbewertung vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. ohne Gegenverkehr) konnte dieses Bedenken jedoch ausräumen. Zwischen den Gegenverkehrsszenarien wurde die automatisierte Fahrt ohne Gegenverkehr jeweils als vergleichbar wahrgenommen (s. Abbildung 34 und Abbildung 35). Zweitens ist die Validität bzw. Praxisrelevanz einer statischen Fahrsimulation zu diskutieren. So könnte die Wahrnehmung der Fahrszenarien durch die bloße Darstellung auf einer Leinwand verzerrt gewesen sein. Außerdem könnten die Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung durch die fehlenden Kräfte in der Fahrdynamik beeinflusst worden sein (z. B. stärkeres Lenken als in der Realität aufgrund fehlender kinetischer Rückmeldung oder aufgrund der zu direkten Lenkung eines Fahrsimulators). Zur Vermeidung einer solchen möglichen Methodenkritik und zum Nachweis der Praxisrelevanz der Ergebnisse sollten die Ergebnisse im Rahmen einer Realfahrtsstudie repliziert werden. Die Studie 6 der Dissertation, die im folgenden Kapitel berichtet ist, nahm sich dieser Aufgabe an.

9. Studie 6 – Konfirmatorische Überprüfung der bestimmten Schwellenwerte und deren Handlungsrelevanz im Sinne funktionaler Verhaltensanpassungen im Realversuch

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0685/2016 durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

This report is based on parts of the research project carried out at the request of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, under research project FE 82.0685/2016.

The author is solely responsible for the content.

9.1. Zielsetzung und Hypothesen

Die letzte Studie der Dissertation, Studie 6, zielte im Rahmen von zwei Fragestellungen auf die Verifikation der zuvor in Studie 4 und 5 erlangten Ergebnisse im Realversuch ab. Die empirische Untersuchung der Fragestellungen wurde von der Autorin der vorliegenden Dissertation im Rahmen eines durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Projekts durchgeführt (Voß & Schwalm, 2019).

In Fortführung des Vorversuchs von Studie 5 wurde im Rahmen eines ersten Studienteils die Fragestellung untersucht, ob die in Studie 4 bestimmten Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes auch im Realversuch bestätigt werden können und somit eine Praxisrelevanz besitzen (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Ausgehend von den bisherigen theoretischen Überlegungen und empirischen Ergebnissen wurden die Hypothesen H1 und H2 abgeleitet:

H1: Automatisierte Trajektorien, die unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Realversuch in den Fahrszenarien der Studie 4 als angemessen bzw. angenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben keinen Eingriffswunsch.

H2: Automatisierte Trajektorien, die oberhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Realversuch in den Fahrszenarien der Studie 4

als nicht angemessen bzw. unangenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben einen Eingriffswunsch.

Abgeleitet von der Hauptstudie der Studie 5 ergab sich die zweite Fragestellung, inwiefern sich die im Fahrsimulator nachgewiesene Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes auch im Realversuch bestätigen lässt (Abbildung 8, blaue Hervorhebung). Diese Fragestellung wurde im Rahmen eines zweiten Studienteils untersucht. Eine erfolgreiche Replikation der Ergebnisse würde für die Validität der Methodik aus Studie 5 und den in dieser Studie abgeleiteten Schlussfolgerungen zum Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) sowie für die Praxisrelevanz der Ergebnisse im Sinne adaptiver Trajektorienmechanismen sprechen. Analog zu Studie 5 ergaben sich hierzu die Hypothesen H3 und H4:

H3: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt nicht überschritten wird, greifen Fahrerinnen und Fahrer auch im Realversuch nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als angemessen und angenehm.

H4: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt überschritten wird, reduzieren Fahrerinnen und Fahrer auch im Realversuch proaktiv die FFT und greifen in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als nicht angemessen und unangenehm.

In den folgenden Abschnitten sind die Methode, die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen der Studie 6 berichtet.

9.2. Methode

Zur Untersuchung der zwei Fragestellungen gliederte sich Studie 6 in zwei Studienteile. Studienteil 1 fokussierte sich auf die erste Fragestellung (konkretisiert in H1 und H2), während Studienteil 2 die zweite Fragestellung (konkretisiert in H3 und H4) untersuchte. Ähnlich zur Vorstudie der Studie 5 erlebten die Versuchspersonen im ersten Studienteil verschiedene automatisierte Fahrten mit unterschiedlichen Lateralversätzen des Ego-Fahrzeugs, die sie subjektiv evaluieren sollten. Vergleichbar zur Hauptstudie der Studie 5 beinhaltete der Studienteil 2 weitere automatisierte Fahrten mit zusätz-

licher FFT-Bearbeitung in unterschiedlichen Gegenverkehrsszenarien (sowohl unkritische als auch kritische Szenarien). Beide Studienteile verwendeten den gleichen grundlegenden Aufbau und wurden im Rahmen eines Versuchs in mehreren Fahrten nacheinander getestet. Im Folgenden ist deshalb die Methodik beider Studienteile kombiniert berichtet. Sofern erforderlich, werden in den Unterkapiteln die Besonderheiten der zwei Studienteile spezifiziert.

9.2.1. Material.

9.2.1.1. Strecke. Die Studie fand auf der Teststrecke des ika statt (s. Abbildung 44). In Anlehnung an die Methodik der Studien 4 und 5 (Kapitel 7.2.1 und Kapitel 8.3.1.1.1) wurde zu Zwecken der Vergleichbarkeit auch in der Realstudie ein zweispuriges Landstraßenszenario mit einer jeweiligen Fahrstreifenbreite von 3.50 m abgebildet. Abbildung 45 zeigt den im Uhrzeigersinn zu absolvierenden Streckenverlauf der Studie, der aus einer Kurve (Radius ca. 45 m) einer ca. 400 m langen Geraden, einer weiteren Kurve (Radius ca. 17.5 m) sowie einer weiteren ca. 400 m langen Geraden bestand. Als solches entsprach eine Fahrt auf der Strecke einer Teststreckenrunde. Es herrschte ein Tempolimit von 50 km/h.



Abbildung 44. Teststrecke des ika

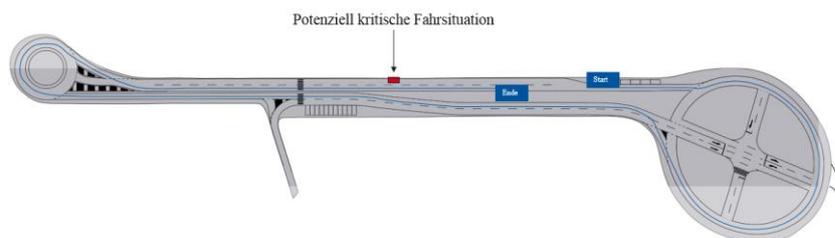


Abbildung 45. Streckenverlauf der Realstudie (Studie 6)

9.2.1.2. Versuchsfahrzeug und automatisierte Fahrfunktion. Als Ego-Fahrzeug wurde ein Passat CC 3.6 V6 FSI mit Automatikgetriebe (22 kW/299 PS; Baujahr 2009) genutzt, der über eine automatisierte Fahrfunktion (s. Nietzsche, Klautt, Klas, Will & Eckstein, 2018) verfügte. Die hard- und softwareseitigen Vorbereitungen der Studie inklusive der Vorbereitung der automatisierten Fahrfunktion, die technische Versuchsbegleitung sowie Unterstützung in der Datenaufbereitung fanden durch den Fachbereich „Automatisiertes Fahren“ des ika statt. Die Fahrzeugbreite betrug 1.86 m. Wie in Studie 5 übernahm das automatisierte System, welches maßgeblich auf der von Nietzsche et al. (2018) vorgestellten automatisierten Fahrfunktion basierte, die Längs- und Querregelung, mit der Einschränkung, dass es auftretenden Hindernissen nicht ausweichen konnte. Als solches mussten die Versuchspersonen bei Bedarf die Fahrzeugführung vom System übernehmen. Bei Auftreten eines Hindernisses gab die automatisierte Fahrfunktion einen ca. vier Sekunden vorgelagerten Hinweis. Dieser war rein informatorisch und keine zwingende Übernahmeaufforderung. Es lag im Ermessen der Fahrerinnen und Fahrer zu entscheiden, ob sie in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen wollten. Eine Systemaktivierung war über das Ziehen des ACC-Hebels unterhalb des Lenkrads möglich, eine Deaktivierung konnte analog jederzeit über das Drücken desselben Hebels bzw. über Eingriffe in die Längs- bzw. Querregelung erfolgen. Sofern das automatisierte System aktiviert war, wurden im Instrumentenkombi ein grünes Tempomaten- und Spurhaltungssymbol angezeigt (s. Abbildung 46). In Abhängigkeit der Fahrt fuhr die automatisierte Fahrfunktion mit einem Lateralversatz von der Fahrstreifenmitte nach links (bezogen auf die Mitte des Ego-Fahrzeugs, s. auch Kapitel 9.2.2).



Abbildung 46. Symbole (Tempomat und Spurhaltung) im Instrumenten-Kombi bei aktiver automatisierter Fahrfunktion in der Realstudie (Studie 6)

9.2.1.3. Gegenverkehrsszenarien. Wie in den Studien 4 und 5 gab es keinen mitfließenden Verkehr, wohl aber ein entgegenkommendes Fahrzeug (s. Kapitel 7.2.1 und Kapitel 8.3.1.1.1). Aus Sicherheitsgründen wurde dieser Gegenverkehr über ein stationäres Ballon-Car aus Kunststoff (Breite 1.50 m) dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Studien 4 und 5 wurden drei Gegenverkehrsszenarien dieser Studien ausgewählt, in denen der Abstand des Gegenverkehrs von der Straßenmitte (bezogen auf die Außenkante des Gegenverkehrs) manipuliert wurde (s. Abbildung 47). In einem ersten Szenario, das gemäß den Ergebnissen der Studien 4 und 5 als subjektiv unkritisch bzw. angenehm klassifiziert wurde, hatte der Gegenverkehr einen Abstand von 0.85 m von der Straßenmitte. Dieses Szenario diente als unkritische Baseline, in der keine Handlungsrelevanz (d. h. Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung) angenommen wurde. Im zweiten Gegenverkehrsszenario betrug der Abstand -0.15 m, d. h. der Gegenverkehr fuhr 15 cm auf dem Ego-Fahrstreifen. Im dritten Szenario hatte der Gegenverkehr ebenfalls einen Abstand von -0.15 m und es wurden zusätzlich Pylonen (aus Sicherheitsgründen anstelle von Baken) am rechten Rand des Ego-Fahrstreifens platziert. Die Pylone begannen ca. 3.60 m vor dem Balloon-Car. Die beiden letztgenannten Szenarien wurden gemäß Studie 4 und 5 als subjektiv kritisch bzw. unangenehm klassifiziert. Es wurde eine Handlungsrelevanz angenommen.



Abbildung 47. Gegenverkehrsszenarien der Realstudie (Studie 6)

Wie bereits erwähnt, hatte das Ego-Fahrzeug eine Breite von 1.86 m. Es war somit breiter als in den Studien 4 und 5 (1.67 m). Mit dem Ziel, die Vergleichbarkeit der Szenarien zwischen den Studien gewährleisten zu können (gleicher Abstand des Ego-Fahrzeugs zur Straßenmitte und den Baken/Pylonen), musste deshalb die der automatisierten Funktion hinterlegte Lateralposition des Ego-Fahrzeugs sowie die Position der Pylonen adaptiert werden. Die Anpassungen sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Zusätzlich zeigt Abbildung 48 eine schematische Darstellung der Gegenverkehrsszenarien.

Tabelle 19

Anpassung der Lateralposition des Ego-Fahrzeugs sowie der Position der Pylonen in der Realstudie (Studie 6)

Studie	Breite Ego-Fahrzeug	Lateralversatz Ego-Fahrzeug von Fahrstreifenmitte	Abstand Ego-Fahrzeug zur Straßenmitte	Position Baken/Pylonen	Abstand Ego-Fahrzeug zu Baken/Pylonen
4/5	1.67 m	0.3 m	0.61 m	0.7 m	0.51 m
6	1.86 m	0.21 m → 0.2 m	0.61 m	0.52 m → 0.5 m	0.51 m

Anmerkung. Die Anpassungen wurden in fett markiert. Die Anpassung der Lateralposition wurde exemplarisch für einen Lateralversatz von 0.3 m dargestellt. Für andere Lateralversätze ist ein analoges Vorgehen zu wählen.

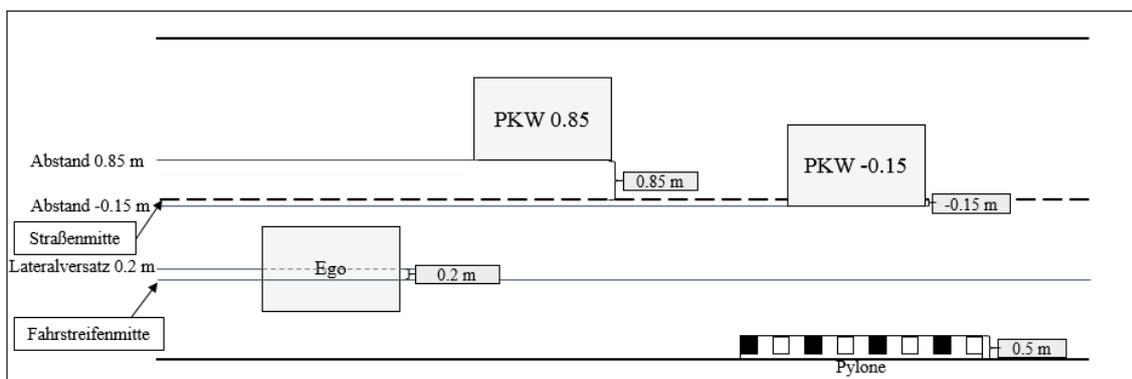


Abbildung 48. Schematische Darstellung der Gegenverkehrsszenarien der Realstudie (Studie 6)

9.2.1.4. FFT. Wie auch in den anderen Fahrversuchen der aktuellen Arbeit bearbeiteten die Versuchspersonen die SuRT als FFT während der automatisierten Fahrt. Es wurde der Schwierigkeitsgrad der Studie 5 übernommen (Ratio 150:125). Die Darstellung der Aufgabe fand auf einem 10.1" Bildschirm (TFT-1026, Lenco; Auflösung 1440×900 px) statt. Zur Aufgabensteuerung wurde ein externes Nummernpad (Keypad ID0120, LogiLink) verwendet. Der Aufbau der SuRT im Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 49 dargestellt.



Abbildung 49. Aufbau der SuRT im Versuchsfahrzeug in der Realstudie (Studie 6)

9.2.1.5. Fragebögen. In beiden Studienteilen wurden die automatisierten Fahrten jeweils über diverse Subjektivitems in paper-pencil Befragungen evaluiert. Die Fragebögen wurden in Anlehnung an die Formulierungen der Studien 4 und 5 (s. Kapitel 7.2.1, Kapitel 8.2.1.1.3 und Kapitel 8.3.1.1.4) erstellt.

Im Studienteil 1 beantworteten die Versuchspersonen pro absolvierter Fahrt Fragen zur Angemessenheit der automatisierten Fahrt insgesamt im Hinblick auf die Position des Ego-Fahrzeugs auf der Straße („angemessen“/„nicht angemessen“) und zum Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung („ja“/„nein“) sowie die Komfort-Sicherheits-Skala (s. Abbildung 24).

Im Studienteil 2 umfassten die Subjektivfragen die Wahrnehmung des Gegenverkehrs („ja“/„nein“), die Angemessenheit der automatisierten Fahrt insgesamt im Hinblick auf die Position des Ego-Fahrzeugs auf der Straße („angemessen“/„nicht angemessen“) sowie die Komfort-Sicherheits-Skala. In Abhängigkeit der Wahrnehmung des Gegenverkehrs fand die Bewertung der Angemessenheit und der Komfort-Sicherheits-Skala entweder für die gesamte Fahrt oder für die zwei Zeiträume vor bzw. ab Erscheinen des Gegenverkehrs statt. Der Zeitraum vor Erscheinen des Gegenverkehrs wurde erneut zur Kontrolle des Versuchsdesigns abgefragt. Zum einen sollten die

Fahrleistungsschwellen in einem unkritischen Fahrszenario ohne Gegenverkehr überprüft werden. Zum anderen sollten potenzielle Wahrnehmungsunterschiede zwischen den Fahrten bzw. Gegenverkehrsszenarien detektiert werden. Als letzter Fragenblock wurden die Versuchspersonen gebeten anzugeben, ob, wie und warum sie in die automatisierte Fahrzeugführung (nicht) eingegriffen hätten.

9.2.2. Design. Wie in Kapitel 9.1 beschrieben, diente der Studienteil 1 der Verifikation des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in eine Realstudie. Für diesen Zweck absolvierten die Versuchspersonen vier automatisierte Fahrten auf der in Kapitel 9.2.1.1 vorgestellten Strecke im Gegenverkehrsszenario Abstand 0.85 m, die sie im Anschluss jeweils subjektiv bewerteten. Es wurde nur dieses eine exemplarische Gegenverkehrsszenario aus Studie 4 getestet, da die Analysen dieser Studie zeigten, dass sich die subjektive Fahrleistungsbewertung nicht signifikant zwischen den getesteten Szenarien unterschied (s. Kapitel 7.3.2). Als UV diente der Innersubjekt-Faktor Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs nach links, der zwischen den vier Fahrten manipuliert wurde. Tabelle 20 beinhaltet die vier Stufen des Faktors, die darüber hinaus in Abbildung 50 schematisch dargestellt sind. Wie in Tabelle 20 ersichtlich ist, lagen zwei der implementierten Lateralversätze unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes und zwei oberhalb dieser Schwelle. Als AV des Studienteils 1 dienten die Subjektivbewertungen auf den Fragebögen (s. Kapitel 9.2.1.5).

Tabelle 20

Ausprägungen des Innersubjekt-Faktors Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6)

Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs		
von der Fahrstreifenmitte nach links		
	Entspricht in Studie 4/5	
0.0 m	0.1 m	Unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts (0.47 m)
0.2 m	0.3 m	
0.4 m	0.5 m	Oberhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts (0.47 m)
0.6 m	0.7 m	

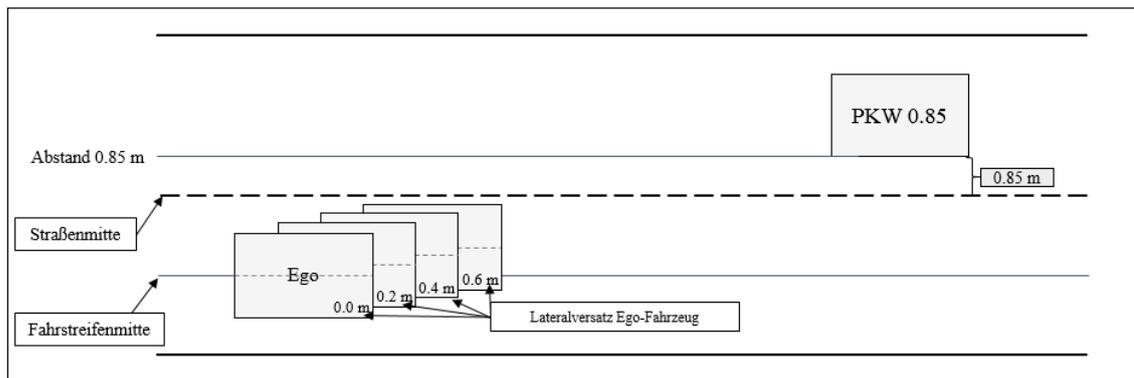


Abbildung 50. Schematische Darstellung des Innersubjekt-Faktors Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs im Gegenverkehrsszenario des Studienteils 1 der Realstudie (Studie 6)

Neben der Verifikation des Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes diente die Studie 6 ebenfalls der Überprüfung der Handlungsrelevanz dieses Schwellenwerts in einer Realstudie. Hierfür absolvierten die Versuchspersonen in Studienteil 2 zwei weitere automatisierte Fahrten. Die UV war das Gegenverkehrsszenario. Sie besaß die in Kapitel 9.2.1.1 vorgestellten drei Ausprägungen (Abstand 0.85 m; Abstand -0.15 m; Abstand -0.15 m + Pylone). Sie wurde als Mixed-Faktor mit zwei Gruppen (A und B) verwendet. Gruppe A absolvierte das unkritische Szenario Abstand 0.85 m, welches als Baseline diente, und das kritische Szenario Abstand -0.15 m. Gruppe B erlebte ebenfalls die Baseline Abstand 0.85 m. Als zweite Fahrt absolvierten die Versuchspersonen in dieser Gruppe das Szenario Abstand -0.15 m + Pylone.

Die AV der Studie entsprachen denen der zu verifizierenden Simulatorstudie (Studie 5, s. Kapitel 8.3.1.2). Als Objektivparameter wurden der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte (bezogen auf die Mitte des Fahrzeugs), die Geschwindigkeit sowie die SuRT-Inputs (Eingaben auf den Pfeiltasten) analysiert. Neben diesen Objektivparametern wurden die automatisierten Fahrten über die in Kapitel 9.2.1.5 genannten Subjektivfragen evaluiert.

9.2.3. Ablauf. Die Studie fand im Juni 2018 statt und hatte eine Dauer von ca. 60 min pro Versuchsperson. Nach einer Begrüßung folgte die Unterzeichnung der Datenschutz- und Geheimhaltungserklärung sowie der Haftungsausschlüsse für Teststrecke und Fahrzeug. Im Anschluss informierte die Versuchsleitung die Versuchsperson, dass es bei der Studie darum ginge, inwiefern eine automatisierte Fahrt als entspannt wahr-

genommen würde. Die Versuchsperson nahm dann auf dem Fahrersitz Platz, die Versuchsleitung auf dem Beifahrersitz. Zusätzlich saß auf der Rückbank eine technische Versuchsleitung, die das automatisierte System überwachte. Anschließend nahm die Versuchsperson die erforderlichen Einstellungen des Sitzes und der Spiegel vor. Die Versuchsleitung erläuterte die allgemeine Fahrzeugbedienung und gab eine erste Einführung in das automatisierte System. Es wurde erklärt, dass es sich um ein automatisiertes System handle, welches Längs- und Querverkehr übernehmen könne. Es wurde noch nicht angesprochen, dass das System auftretenden Hindernissen nicht selbstständig ausweichen könne. Zur Gewöhnung an das Fahrzeug folgte eine automatisierte Übungsfahrt auf der Teststrecke (eine Runde), die nicht-automatisiert begann und in der das automatisierte System einige Male (de-) aktiviert werden konnte. Als Richtgeschwindigkeit wurde das Tempolimit von 50 km/h angegeben.

Im anschließenden Studienteil 1 absolvierte die Versuchsperson gemäß dem Design vier automatisierte Fahrten mit unterschiedlichen Lateralversätzen des Ego-Fahrzeugs. Ähnlich zu Studie 4 fand keine Randomisierung der Fahrten statt, sondern der Lateralversatz wurde startend bei 0.0 m inkrementell erhöht. Wie in der Übungsfahrt wurde die Versuchsperson noch nicht darüber informiert, dass das automatisierte System nicht selbstständig Hindernissen ausweichen kann. Jede der Fahrten begann nicht-automatisiert und die Versuchsperson aktivierte das automatisierte System noch vor Einfahrt in die erste Kurve. Da es ausschließlich um die subjektive Bewertung der Fahrten ging und um die Vergleichbarkeit zu Studie 4 zu gewährleisten, wurde der über ein potenzielles Hindernis informierende Hinweiston des automatisierten Systems deaktiviert und keine FFT bearbeitet. Am Ende jeder Fahrt kam das Fahrzeug zum Stillstand und es folgte der Subjektivfragebogen zur Bewertung der automatisierten Fahrt. Nach Bearbeitung des vierten Subjektivfragebogens war der Studienteil 1 beendet.

In Nachfolge zum Studienteil 1 beantwortete die Versuchsperson den Fragebogen zur (Sozio-) Demografie. Es wurde die Cover-Story gegeben, dass die Pause genutzt würde, um die im ersten Teil gegebenen Bewertungen auszuwerten und das automatisierte System zu trainieren.

Zu Beginn des Studienteils 2 folgte eine weitere Instruktion. Es wurde die SuRT erklärt und die Versuchsperson konnte sie kurz ausprobieren. Des Weiteren wurde das automatisierte System detaillierter erläutert. Die Versuchsleitung instruierte, dass das System auftretenden Hindernissen oder Gegenverkehr nicht selbstständig ausweichen

könne und die Versuchsperson deshalb im Bedarfsfall die Fahrzeugführung übernehmen können müsse. Bei einem Hindernis/Gegenverkehr gäbe das System einen vorgelagerten Hinweiston, der nicht als Übernahmeaufforderung, sondern als Information zu verstehen sei. Je nach ihrem Subjektivempfinden solle die Versuchsperson entscheiden, inwiefern sie in die automatisierte Fahrzeugführung eingreifen wolle. Es folgten die zwei automatisierten Fahrten gemäß Gruppenzuteilung (Gruppe A und B). Dabei fand keine Randomisierung statt, sondern jede Versuchsperson startete mit dem unkritischen Szenario Abstand 0.85 m. In beiden Gruppen bzw. Fahrten fuhr das Ego-Fahrzeug bei aktiver Automation mit einem Lateralversatz von 0.2 m (bezogen auf die Fahrstreifenmitte) nach links. Dieser Wert entsprach dem in Studie 5 verwendeten Lateralversatz. Im Vergleich zum Studienteil 1 wurde die Fahrfunktion im Studienteil 2 bei aktiver Automation im vollen Systemumfang, d. h. auch unter Verwendung des Hinweistons bei einem potenziellen Hindernis, genutzt. Der Start jeder Fahrt erfolgte nicht-automatisiert und die Versuchsperson wurde gebeten, das automatisierte System noch vor Einfahrt in die erste Kurve zu aktivieren. Die Versuchsperson bearbeitete während der gesamten Fahrt die SuRT als FFT. Nach Ende jeder Fahrt beantwortete die Versuchsperson den Subjektivfragebogen. Nach Abschluss der zweiten Fahrt war die Studie beendet. Die Versuchsleitung klärte die Versuchsperson über die Studienhintergründe auf und verabschiedete sie.

9.2.4. Stichprobe. Die Versuchspersonenakquise fand über persönlichen Kontakt und die Versuchspersonendatenbank des ika statt. Es nahmen $N = 29$ ($n = 5$ weiblich) Versuchspersonen an der Studie teil (Gruppe A: $n = 14$; Gruppe B: $n = 15$). Es lagen keine unkorrigierten Seh- oder Hörbeeinträchtigungen vor. Das Durchschnittsalter lag bei $M = 36$ Jahren ($SD = 18$), der durchschnittliche Führerscheinbesitz betrug $M = 19$ Jahre ($SD = 19$). Alle Versuchspersonen besaßen die deutsche Nationalität. Im Mittel wurde eine jährliche Kilometerleistung von $M = 13810$ km ($SD = 9677$) angegeben, die sich zu 47 % auf die Autobahn, zu 29 % auf die Stadt und zu 24 % auf die Landstraße verteilten. 76 % der Stichprobe hatten bereits Erfahrung mit Fahrassistenzsystemen, wobei Tempomat ($n = 15$), Spurhaltesysteme ($n = 9$), ACC ($n = 7$) und Einparkhilfen ($n = 7$) die am häufigsten genannten Systeme waren. Die Versuchspersonen erhielten keine Incentivierung.

9.3. Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Studie 6 berichtet. Dabei orientieren sich die Inhalte der Analysen sowie deren Struktur stark an den Studien 4 und 5, da das Ziel der aktuellen Studie die Verifikation der in diesen vorherigen Studien erlangten Ergebnisse war. In Kapitel 9.3.1 werden zunächst die Analyseergebnisse des Studienteils 1 (die Verifikation der Schwellenwerte) vorgestellt. Anschließend beinhaltet Kapitel 9.3.2 die Ergebnisse des Studienteils 2 (die Überprüfung der Handlungsrelevanz).

9.3.1. Verifikation der Schwellenwerte (Studienteil 1). Studienteil 1 hatte zum Ziel, die mittels der Online-Studie (Studie 4) bestimmten Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung für den Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs in einer Realfahrt zu verifizieren (Fragestellung 1 und Hypothesen H1 und H2). Die Ergebnisse der einzelnen Subjektivitems sind in den folgenden Kapiteln berichtet.

9.3.1.1. Angemessenheit der Ego-Trajektorie. Ein erstes Item betraf die Bewertung der Angemessenheit der automatisierten Ego-Trajektorie im Hinblick auf die Position des Ego-Fahrzeugs auf der Straße. Abbildung 51 zeigt die Bewertung dieses Items für alle vier der getesteten Lateralversätze.

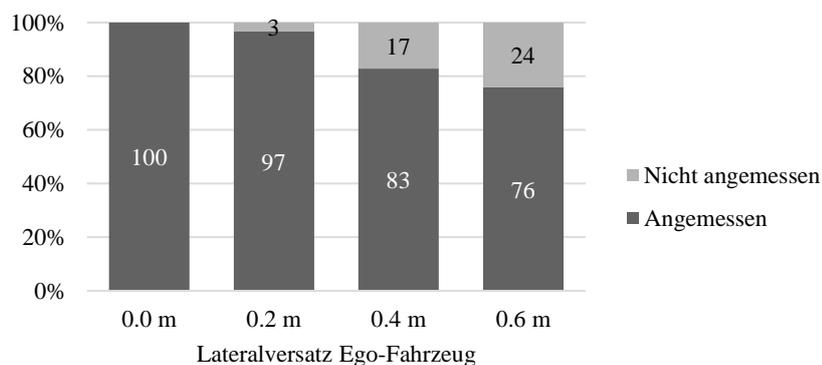


Abbildung 51. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung der Ego-Trajektorie pro Lateralversatz im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6)

Die zwei Lateralversätze, die unterhalb des in der Online-Studie bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung lagen (Lateralversätze 0.0 m und 0.2 m), wurden dabei von fast allen Versuchspersonen als angemessen bewertet. Die zwei Lateralversätze, die oberhalb des Schwellenwerts lagen (0.4 m

und 0.6 m), wurden im Vergleich hierzu schlechter bewertet. Allerdings wurde auch hier die Ego-Trajektorie zu mindestens 75 % als angemessen bewertet.

9.3.1.2. Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung. In Abbildung 52 ist in vergleichbarer Weise zur Angemessenheitsbewertung der Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung pro Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs abgetragen.

Bei den Lateralversätzen unterhalb des Schwellenwerts einer subjektiv angemessenen empfundenen Fahrleistung (0.0 m und 0.2 m) gab der Großteil der Versuchspersonen an, keinen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung zu beabsichtigen. Während beim Lateralversatz von 0.4 m noch 75 % der Stichprobe keinen Eingriffswunsch hegte, würde bei 0.6 m Lateralversatz die Hälfte der Versuchspersonen in die Fahrzeugführung eingreifen wollen. Im Vergleich der beiden Items zur Angemessenheit und zum Eingriffswunsch ließ sich somit, vor allem hinsichtlich der Lateralversätze 0.4 m und 0.6 m, ein divergierender Verlauf der prozentualen Verteilungskurven feststellen. Die Bewertung des Eingriffswunschs rief im Vergleich zur Angemessenheitsbewertung bei steigendem Lateralversatz eine stärkere Ablehnung der Ego-Trajektorie hervor.

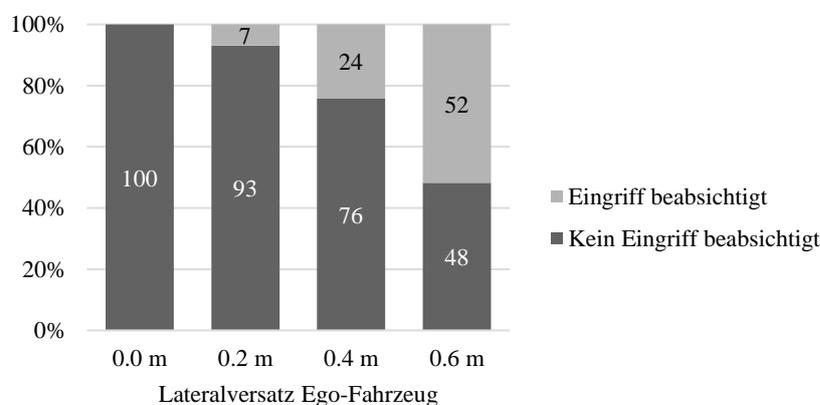


Abbildung 52. Prozentuale Verteilung des Eingriffswunschs in die automatisierte Fahrzeugführung pro Lateralversatz im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6)

9.3.1.3. Komfort-Sicherheits-Skala. Neben diesen beiden binären Items wurde außerdem die Komfort-Sicherheits-Skala verwendet. In Abbildung 53 sind die deskriptiven Statistiken hierzu pro Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs dargestellt.

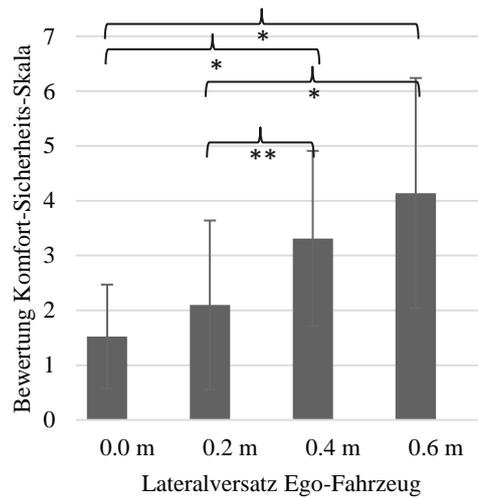


Abbildung 53. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala pro Lateralsatz des Ego-Fahrzeugs im Studienteil 1 der Realstudie (Studie 6). Anmerkung. * $p < .001$; ** $p < .05$.

Zur inferenzstatistischen Analyse der Skala wurde eine univariate ANOVA mit der UV Lateralsatz des Ego-Fahrzeugs (0.0 m, 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m) und der AV Skalenwert der Komfort-Sicherheits-Skala durchgeführt. Sie ergab einen signifikanten Effekt mit $F(3, 112) = 15.73$, $p < .001$, $\eta^2 = .30$. Die Ergebnisse von angeschlossenen post-hoc Tests (Bonferroni-korrigiert) sind ebenfalls in Abbildung 53 dargestellt. Als solches unterschieden sich die zwei Lateralsätze unterhalb des Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung nicht signifikant voneinander. Gleiches galt für die zwei Lateralsätze oberhalb des Schwellenwerts. Allerdings unterschieden sich die Lateralsätze 0.0 m und 0.2 m jeweils signifikant von den Versätzen 0.4 m und 0.6 m. Die höheren Lateralsätze wurden als signifikant kritischer eingestuft. Des Weiteren war auffällig, dass die Mittelwerte der Komfort-Sicherheits-Skala für die Lateralsätze 0.4 m und 0.6 m, die oberhalb des Schwellenwerts lagen, ca. ein bis zwei Skalenpunkte niedriger lagen, als die mittlere Bewertung am bestimmten Schwellenwert in der Online-Studie (Studie 4, s. Kapitel 7.3.2). D. h., selbst bei höheren Lateralsätzen fiel die Bewertung in der Realstudie im Vergleich zur Online-Studie milder aus.

9.3.2. Überprüfung der Handlungsrelevanz (Studienteil 2). Der Studienteil 2 diente der Überprüfung der in Studie 5 identifizierten Handlungsrelevanz der subjektiven Fahrleistungsschwellen im Realversuch. Die Ergebnisauswertung wurde analog zum Vorgehen in Studie 5 (s. Kapitel 8.3.2) durchgeführt. Im Sinne der konfirmatori-

schen Überprüfung wurden die im Studienteil 2 erlangten Ergebnisse an verschiedenen Stellen der Analysen in direkten Bezug zu den Ergebnissen der Studie 5 gebracht.

9.3.2.1. Wahrnehmung des Gegenverkehrs und Angemessenheit der Ego-Trajektorie. Als Kontrolle wurde zunächst überprüft, ob der Gegenverkehr (das Balloon-Car) wahrgenommen wurde. Dies konnte für jede Versuchsperson in jedem Szenario bestätigt werden. Als solches fand die Bewertung der weiteren Fragen separat für die zwei Zeitpunkte vor und ab Erscheinen des Gegenverkehrs statt. In Abbildung 54 ist die prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung für die drei Gegenverkehrsszenarien des Studienteils 2 pro Zeitpunkt (vor und ab Erscheinen des Gegenverkehrs) abgetragen. Vor Erscheinen des Gegenverkehrs wurde die automatisierte Fahrt von den Versuchspersonen in allen drei Szenarien im Hinblick auf die Position ihres eigenen Fahrzeugs auf der Straße als angemessen wahrgenommen. Auf deskriptiver Basis unterschied sich die Bewertung für die drei Szenarien nicht voneinander (> 90 %). D. h., es gab keine Bewertungstendenzen zwischen den Fahrten bzw. den Gegenverkehrsszenarien. Die Verkehrssituation schien in allen Fahrten vor Erscheinen des Gegenverkehrs durchweg gleich wahrgenommen zu werden. Im unkritischen Szenario Abstand 0.85 m ergab sich ab Erscheinen des Gegenverkehrs eine ähnliche Bewertung im Vergleich zum vorherigen Zeitpunkt. Für die zwei kritischen Szenarien zeigte sich ein anderes Bild. Im Szenario Abstand -0.15 m bewertete die Hälfte der Versuchspersonen die automatisierte Fahrt als nicht angemessen; im Szenario Abstand -0.15 m + Pylonen lag diese Quote bei 73 %.

Zur confirmatorischen Überprüfung der Ergebnisse der Studie 5 sind in Abbildung 54 zusätzlich die Vergleichswerte dieser Studie abgetragen. Der Vergleich zeigt, dass sich die Ergebnisse in allen drei Szenarien für den Zeitpunkt vor Erscheinen des Gegenverkehrs decken. Ab Erscheinen des Gegenverkehrs waren die Ergebnisse für die Szenarien Abstand 0.85 m und Abstand -0.15 m ebenfalls vergleichbar. Für das Szenario Abstand -0.15 m + Pylonen war die Bewertung in der Realstudie deutlich kritischer.

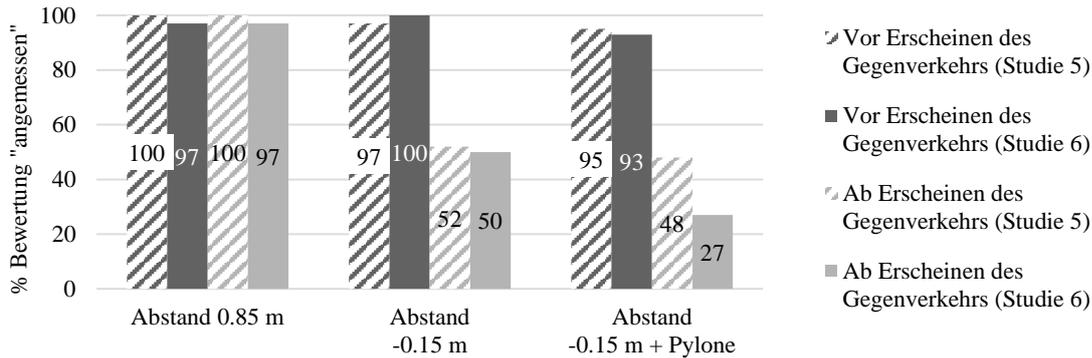


Abbildung 54. Prozentuale Verteilung der Angemessenheitsbewertung in den drei Gegenverkehrsszenarien des Studienteils 2 der Realstudie (Studie 6). Anmerkung. Zum Vergleich sind die in Studie 5 gemachten Bewertungen als schraffierte Balken abgetragen.

9.3.2.2. Subjektiv berichtete Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung.

Wie in Studie 5 gaben die Versuchspersonen subjektiv an, inwiefern sie in die automatisierte Fahrzeugführung bei Erscheinen des Gegenverkehrs eingriffen. Während im Szenario Abstand 0.85 m nur $n = 1$ Versuchsperson (3 %, zum Vergleich Studie 5: 2 %) einen Eingriff berichtete, griffen in den beiden anderen Szenarien ca. 2/3 der Stichprobe in die automatisierte Fahrzeugführung ein (Abstand -0.15 m: 71 %, zum Vergleich Studie 5: 50 %; Abstand -0.15 m + Pylonen: 67 %, zum Vergleich Studie 5: 63 %). Im Vergleich zu Studie 5 war somit die subjektiv berichtete Eingriffsrate in den beiden kritischen Gegenverkehrsszenarien deskriptiv höher.

9.3.2.3. Komfort-Sicherheits-Skala. In Abbildung 55 ist die Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala für die drei Gegenverkehrsszenarien pro Zeitpunkt (vor und ab Erscheinen des Gegenverkehrs) abgetragen. Vor Erscheinen des Gegenverkehrs lag die Bewertung in allen drei Szenarien in einem angenehmen Bereich. Ab Erscheinen des Gegenverkehrs wurde das Szenario Abstand 0.85 m ebenfalls als angemessen bewertet. Für die kritischen Szenarien lag die Bewertung in einem unangenehmen (Abstand -0.15 m) bzw. kritischen Bereich (Abstand -0.15 m + Pylone). Wie für die Angemessenheitsbewertung sind in Abbildung 55 die Vergleichswerte aus Studie 5 als schraffierte Balken dargestellt. Der deskriptive Vergleich der zwei Studien zeigt, dass in der Realstudie (Studie 6) die Bewertungen um ca. einen Punkt schlechter ausfielen als im Simulator (Studie 5).

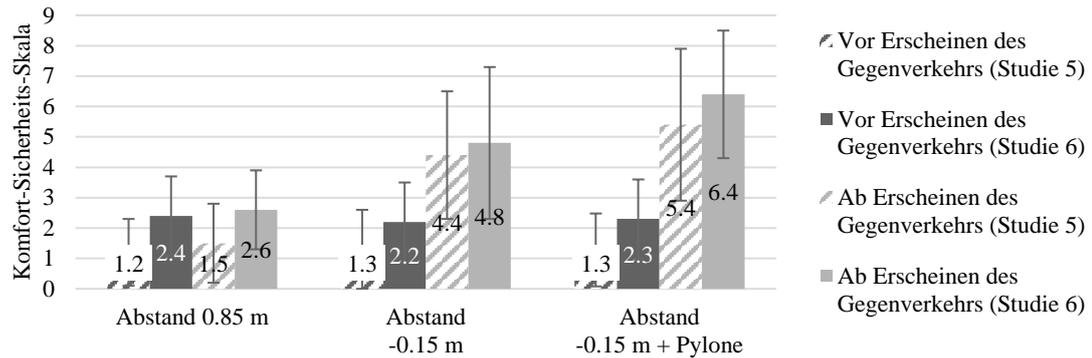


Abbildung 55. Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala in den drei Gegenverkehrsszenarien des Studienteils 2 der Realstudie (Studie 6). Anmerkung. Zum Vergleich sind die in Studie 5 gemachten Bewertungen als schraffierte Balken abgetragen.

Es folgte eine inferenzstatistische Analyse der Daten. Hierzu wurde eine ANOVA mit Messwiederholung mit den UV Zeitpunkt (vor Erscheinen des Gegenverkehrs, ab Erscheinen des Gegenverkehrs) und Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m, Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Pylone) berechnet. Die AV war die Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala. Sowohl der Haupteffekt Zeitpunkt ($F(1, 55) = 90.43$, $p < .001$, $\eta^2 = .62$) als auch die Interaktion Zeitpunkt*Gegenverkehrsszenario ($F(2, 55) = 26.48$, $p < .001$, $\eta^2 = .49$) wurden signifikant. Zur Spezifikation der Effekte wurden angeschlossene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) für die Interaktion berechnet. Sie zeigten, wie in Studie 5 (s. Kapitel 8.3.2.3), dass sich die Gegenverkehrsszenarien vor Erscheinen des Gegenverkehrs hinsichtlich der Bewertung auf der Komfort-Sicherheits-Skala nicht signifikant voneinander unterschieden. Aus diesem Grund kann von einer gleichen Wahrnehmung der Trajektorie zwischen den Fahrten vor Erscheinen des Gegenverkehrs ausgegangen werden. Ab Erscheinen des Gegenverkehrs hingegen unterschied sich das unkritische Szenario Abstand 0.85 m wie in Studie 5 (s. Kapitel 8.3.2.3) signifikant von den zwei kritischen (jeweils $p < .01$). Die beiden kritischen Szenarien unterschieden sich im Gegensatz zu Studie 5 allerdings nur marginal voneinander ($p < .1$). Die Bewertung des Szenarios Abstand 0.85 m unterschied sich nicht signifikant zwischen den zwei Zeitpunkten und fiel in beiden Fällen als angenehm aus (im Vergleich zu Studie 5, in der es einen signifikanten Unterschied gab, s. Kapitel 8.3.2.3). Die beiden kritischen Szenarien wurden, wie in Studie 5 (s. Kapitel 8.3.2.3), zwischen den Zeitpunkten signifikant unterschiedlich bewertet ($p < .001$), wobei die Bewertung ab Erscheinen des Gegenverkehrs kritischer ausfiel.

Abschließend wurden die Bewertungen auf der Komfort-Sicherheits-Skala zwischen den Studien 5 und 6 inferenzstatistisch miteinander verglichen. Hierzu wurde eine multivariate ANOVA mit den UV Studie (Studie 5, Studie 6) und Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m, Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Baken/Pylone) sowie den AV Komfort-Sicherheits-Skala vor Erscheinen des Gegenverkehrs und Komfort-Sicherheits-Skala ab Erscheinen des Gegenverkehrs berechnet. Es wurden insbesondere die paarweisen Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) der Interaktion Studie*Gegenverkehrsszenario pro AV betrachtet. Wie die deskriptive Betrachtung bereits andeutete, fiel die Bewertung der Komfort-Sicherheits-Skala vor Erscheinen des Gegenverkehrs in allen drei Gegenverkehrsszenarien in Studie 6 im Vergleich zu Studie 5 signifikant kritischer aus ($p < .05$). Ab Erscheinen des Gegenverkehrs war das Bild etwas heterogener. Während im unkritischen Szenario Abstand 0.85 m die Bewertung in Studie 6 ebenfalls signifikant kritischer war ($p < .05$), war dieser Effekt für das Szenario Abstand -0.15 m nicht zu finden. Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone wurde der deskriptive Trend einer kritischeren Bewertung in Studie 6 marginal signifikant ($p < .1$).

9.3.2.4. Offene Kommentare. Neben den geschlossenen Fragen wurden die Versuchspersonen über die Begründung für bzw. gegen einen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung und, sofern durchgeführt, dessen Art befragt. Die detaillierten Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 35 bis Tabelle 40 (Anhang F) zu finden. Im unkritischen Baseline-Szenario Abstand 0.85 m griffen $n = 28$ Versuchspersonen nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein und gaben als Begründung für ihr Nichteingreifen an, dass es keine Notwendigkeit/keinen Grund gab ($n = 9$), die Spurposition gut war ($n = 8$), der Abstand bzw. der Platz genügte ($n = 6$), keine Gefahr bestand ($n = 4$) und die Situation in Ordnung war ($n = 1$) (s. Tabelle 35). Tabelle 36 zeigt, dass im Szenario Abstand -0.15 m $n = 10$ Versuchspersonen in die Fahrzeugführung eingriffen und diese Eingriffe zumeist eine Lenkbewegung bzw. ein Ausweichen waren. Nur $n = 1$ Versuchsperson gab an, durch ein Abbremsen in die Fahrzeugführung eingegriffen zu haben. Als Begründung für ihr Eingreifen nannten die Teilnehmenden ein Fehlverhalten des Gegenverkehrs ($n = 5$), die Gefahr einer Kollision ($n = 4$) und eine schlechte Spurposition ($n = 1$). Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone griffen ebenfalls $n = 10$ Versuchspersonen in die Fahrzeugführung ein, wobei hier entweder gelenkt ($n = 10$) und/oder gebremst wurde ($n = 3$). Die Gründe bezogen sich auf eine schlechte Spurposition ($n = 3$),

die Gefahr einer Kollision ($n = 3$), ein Fehlverhalten des Gegenverkehrs ($n = 2$) und den mangelnden Platz ($n = 2$).

In einigen zusätzlichen Kommentaren merkten einzelne Teilnehmende an, dass die automatisierte Fahrt sich durch die Bearbeitung der FFT ungewohnt bzw. unangenehm anfühle, und man den Gegenverkehr dadurch spät bzw. gar nicht wahrnehme. Erst der Hinweiston würde auf das potenzielle Hindernis aufmerksam machen. Des Weiteren wurde erwähnt, dass der Realversuch im Vergleich zur Fahrsimulation aufgrund der echten Gefahr „aufregender“ sei, man sich aber mit jeder Fahrt sicherer fühle.

9.3.2.5. Aufbereitung der Objektivdaten. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden für jede der $N = 29$ Versuchspersonen für die diversen Objektivparameter ein Datensatz mit zwei Fällen (d. h., eine Fahrt entsprach einem Fall) erzeugt. Datenfehler und technische Fehler führten zum Ausschluss von $n = 6$ Fällen. $N = 1$ weiterer Fall musste aufgrund fehlender Übereinstimmung von Subjektiv- und Objektivdaten von der Objektivauswertung ausgeschlossen werden. Diese fehlende Übereinstimmung hieß, dass die Objektivdaten zwar auf einen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung hindeuteten, dieser subjektiv jedoch nicht berichtet wurde. In den Analysen der Objektivdaten wurden verschiedene Gruppen von Fällen miteinander verglichen. Es wurden die Gegenverkehrsszenarien und das Eingriffsverhalten (kein Eingriff vs. Eingriff) unterschieden. Tabelle 21 und Tabelle 22 beinhalten die Fälle vor Ausschluss, d. h. die Fälle in der Subjektivauswertung, sowie die Fälle nach Ausschluss, d. h. die Fälle in der Objektivauswertung. Tabelle 22 zeigt zusätzlich, wie die Fälle der Objektivauswertung bei einem Eingriff hinsichtlich der Eingriffsart (Lenken vs. Bremsen) klassifiziert werden konnten. Mit Blick auf die einzelnen Fallzahlen in Tabelle 22 lässt sich außerdem feststellen, dass die Gruppengrößen sehr unterschiedlich bzw. sehr gering waren. Ein Einfluss auf die Ergebnisse der späteren inferenzstatistischen Analysen kann somit nicht ausgeschlossen werden. Da gemäß Tabelle 21 und Tabelle 22 insbesondere in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Pylone) eingegriffen wurde, fokussierten sich die nachfolgenden Analysen der Objektivdaten (insbesondere für die Fahrdaten) auf diese zwei Szenarien.

Tabelle 21

Fallzahlen vor Ausschluss (d. h. Fälle in der Subjektivauswertung) in der Realstudie (Studie 6)

	Kein Eingriff	Eingriff	Summe
Abstand 0.85 m	28	1	29
Abstand -0.15 m	4	10	14
Abstand -0.15 m + Pylone	5	10	15
Summe	37	21	58

Tabelle 22

Fallzahlen nach Ausschluss (d. h. Fälle in der Objektivauswertung) in der Realstudie (Studie 6)

	Kein Eingriff	Eingriff	Summe
Abstand 0.85 m	24	1	Lenken ($n = 1$)
			Bremmung ($n = 0$)
			Beides ($n = 0$)
			25
Abstand -0.15 m	3	10	Lenken ($n = 8$)
			Bremmung ($n = 0$)
			Beides ($n = 2$)
			13
Abstand -0.15 m + Pylone	4	9	Lenken ($n = 5$)
			Bremmung ($n = 0$)
			Beides ($n = 4$)
			13
Summe	31	20	51

Wie in den Studien 1 und 5 fand eine Aufbereitung und Analyse der Objektivdaten (Fahrparameter und FFT-Bearbeitung) über den Zeitverlauf statt (s. Kapitel 4.3.1 und 8.3.2.5), um den proaktiven Mechanismus der funktionalen Verhaltensanpassungen untersuchen zu können. Die Fahrdaten (Geschwindigkeit und Lateralversatz) wurden zu Intervallen t_i mit einer Länge von 500 ms aggregiert (in Anlehnung an die Intervalllänge der Studie 5). Erneut diente der Hinweiston, der auf den Gegenverkehr aufmerksam machte, als zeitlicher Referenzpunkt t_0 . t_{-1} umfasste also Fahrdaten der letzten 500 ms vor dem Hinweiston, t_{+1} die Fahrdaten der ersten 500 ms nach dem Hinweiston. Wie in Studie 5 wurden die Intervalle t_{-8} bis t_{+16} in den Analysen berücksichtigt. Die SuRT-Aktivität wurde erneut kontinuierlich aufgezeichnet, sodass für jedes Intervall t_i die Anzahl der SuRT-Inputs addiert wurde. Abbildung 56 beinhaltet den zeitlichen Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignisse bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h.

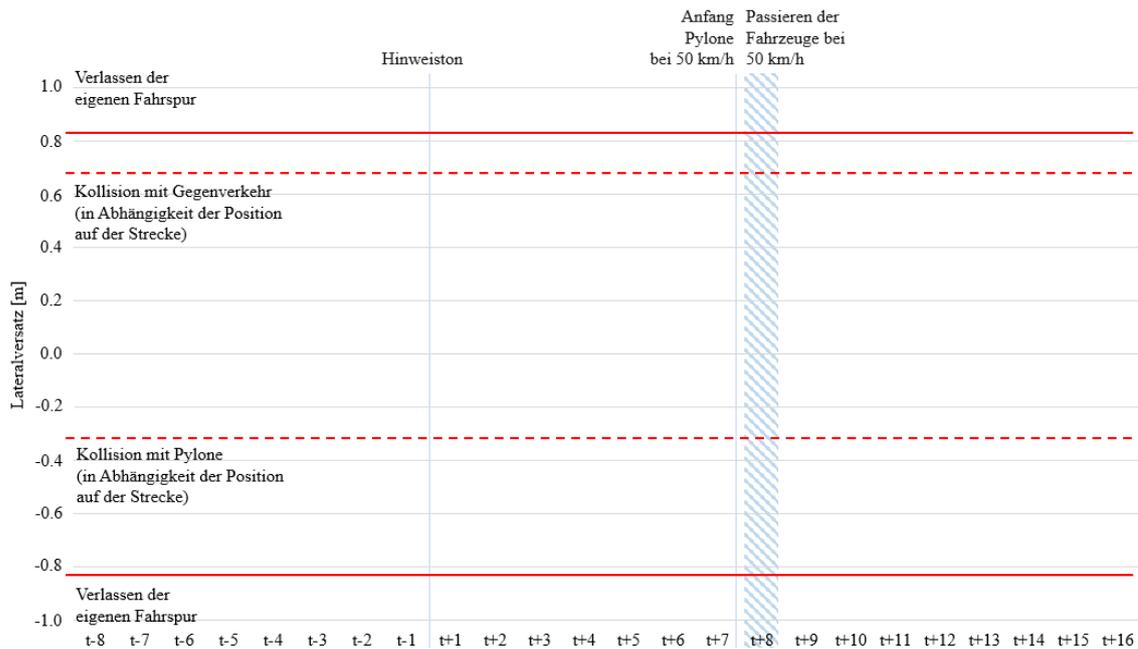


Abbildung 56. Intervallskaliertes zeitliches Verlauf eines Gegenverkehrsszenarios inklusive aller relevanten Ereignis-
se bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

9.3.2.6. SuRT-Aktivität. Im Rahmen einer vorgelagerten Validitätsüberprüfung der SuRT-Daten wurde die Qualität der SuRT-Bearbeitung über die gesamte Fahrt analysiert. Pro Fahrt bearbeiteten die Versuchspersonen durchschnittlich $M = 19$ Trials ($SD = 9$). Die Quote korrekter Trials lag bei 98.1 %. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Teilnehmenden die FFT mit ausreichender Qualität bearbeiteten und die SuRT-Inputs ein valides Maß der FFT-Bearbeitung darstellen. Eine zusätzliche subjektive Beobachtung der Versuchsleitung war, dass die FFT-Aktivität im Vergleich zur Simulatorstudie (Studie 5) insgesamt niedriger war.

In Abbildung 57 sind die über alle Versuchspersonen gemittelten SuRT-Inputs für die zwei kritischen Gegenverkehrsszenarios (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das unkritische Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff abgetragen.

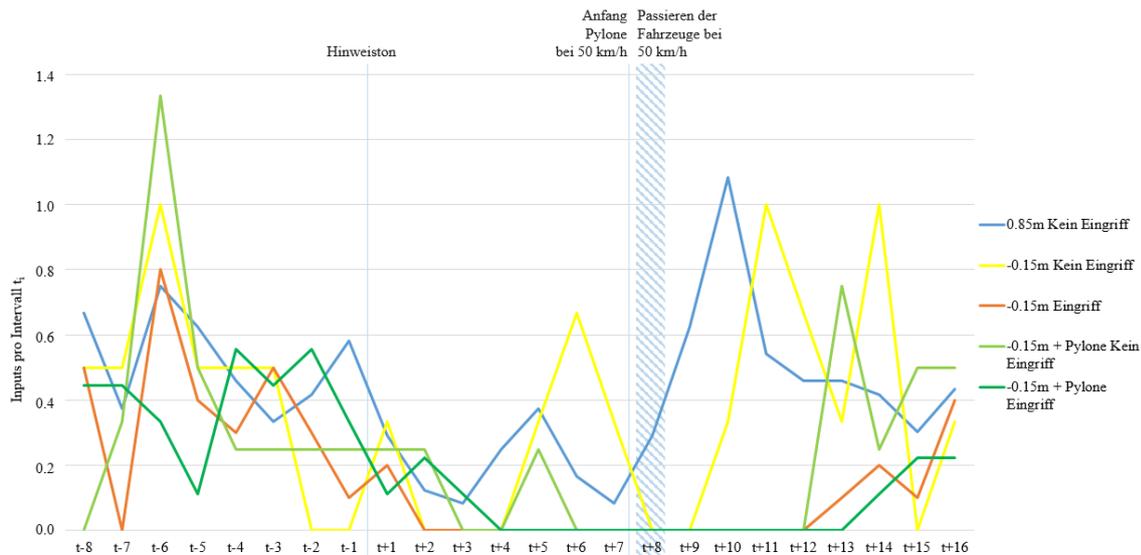


Abbildung 57. SuRT-Inputs in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff sowie für das Vergleichsszenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

Deskriptiv wurde die SuRT-Aktivität im unkritischen Szenario (Abstand 0.85 m, kein Eingriff) nach dem Hinweiston reduziert, jedoch nicht auf null reduziert. Ab t_{+7} , d. h. noch vor Passieren der Fahrzeuge, erhöhten die Versuchspersonen wieder die Aktivität. Für die zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien zeigte sich deskriptiv, dass die SuRT-Aktivität nach dem Hinweiston vollständig unterbrochen wurde. Im Falle keines Eingriffs wurde die Aktivität je nach Szenario ab t_{+5} (Abstand -0.15 m) bzw. t_{+12} (Abstand -0.15 m + Pylone) wieder erhöht. Im Falle eines Eingriffs in die automatisierte Fahrzeugführung fand in beiden kritischen Szenarien keine bzw. lediglich eine geringe Erhöhung der SuRT-Inputs nach Passieren der Fahrzeuge statt. Zusammenfassend unterschied sich die SuRT-Aktivität auf deskriptiver Basis zwischen unkritischen und kritischen Szenarien. Die Muster der SuRT-Inputs decken sich außer für die zwei kritischen Szenarien ohne Eingriff zwischen den Studien 5 und 6 (s. Kapitel 8.3.2.6).

Es wurde eine inferenzstatische Analyse der Daten angeschlossen. Zuerst wurden die kritischen Szenarien mit dem unkritischen Szenario mittels einer univariaten ANOVA verglichen. Die UV waren das Gegenverkehrsszenario (Abstand 0.85 m kein Eingriff, Abstand -0.15 m kein Eingriff, Abstand -0.15 m Eingriff, Abstand -0.15 m + Pylone kein Eingriff, Abstand -0.15 m + Pylone Eingriff) und der Zeitpunkt (t_{-8} bis t_{+16}). Die AV waren die SuRT-Inputs. Es wurde nur der Haupteffekt Gegenverkehrsszenario signifikant ($F(4, 1067) = 8.38, p < .001, \eta_p^2 = .030$). An diesen Hauptef-

fekt angeschlossene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) zeigten, dass sich das unkritische Vergleichsszenario (Abstand 0.85 m, kein Eingriff) nur von den kritischen Szenarien unterschied, wenn in diesen eingegriffen wurde ($p < .001$). Trotz der fehlenden Signifikanz auf Interaktionsebene wurden zusätzliche paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) für Gegenverkehrsszenario*Zeitpunkt berechnet. Laut diesen waren die SuRT-Inputs im Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff ab t_{+10} im Vergleich zu den ersten Intervallen nach dem Hinweiston (t_{+1} bis t_{+3}) signifikant höher ($p < .05$).

Eine zweite univariate ANOVA untersuchte die Unterschiede zwischen den zwei kritischen Szenarien. Die UV waren das Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Pylone), der Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) und der Zeitpunkt (t_{-8} bis t_{+16}). Die AV waren erneut die SuRT-Inputs. Es wurden ausschließlich die beiden Haupteffekte Eingriff ($F(1, 517) = 11.99$, $p < .01$, $\eta_p^2 = .023$) und Zeitpunkt ($F(23, 517) = 3.57$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .137$) signifikant. D. h., die SuRT-Aktivität hing in den kritischen Szenarien vor allem vom Zeitpunkt und davon ab, ob die Versuchspersonen die Fahrzeugführung übernahmen. Angeschlossene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) für den Faktor Zeitpunkt legten nahe, dass der Haupteffekt des Faktors vor allem auf den Zeitpunkt t_{-6} (also noch vor dem Hinweiston) zurückzuführen war und deshalb eher als Artefakt betrachtet werden kann. Wie erwähnt wurde der Haupteffekt Gegenverkehrsszenario nicht signifikant. Allerdings bestand ein marginaler Effekt für die Interaktion Gegenverkehrsszenario*Eingriff ($p < .1$). Dabei lag der Effekt zwischen den zwei Szenarien tendenziell bei keinem Eingriff ($p < .1$). Dieses Ergebnis passt zur deskriptiven Auswertung, die zeigte, dass bei keinem Eingriff die Aktivität im Szenario Abstand -0.15 m höher war als im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone.

9.3.2.7. Geschwindigkeit. Wie in Studie 5 war ein erster Fahrparameter, der analysiert wurde, die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs im Zeitverlauf. Abbildung 58 beinhaltet den Geschwindigkeitsverlauf für die zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Pylone bei keinem Eingriff und Eingriff.

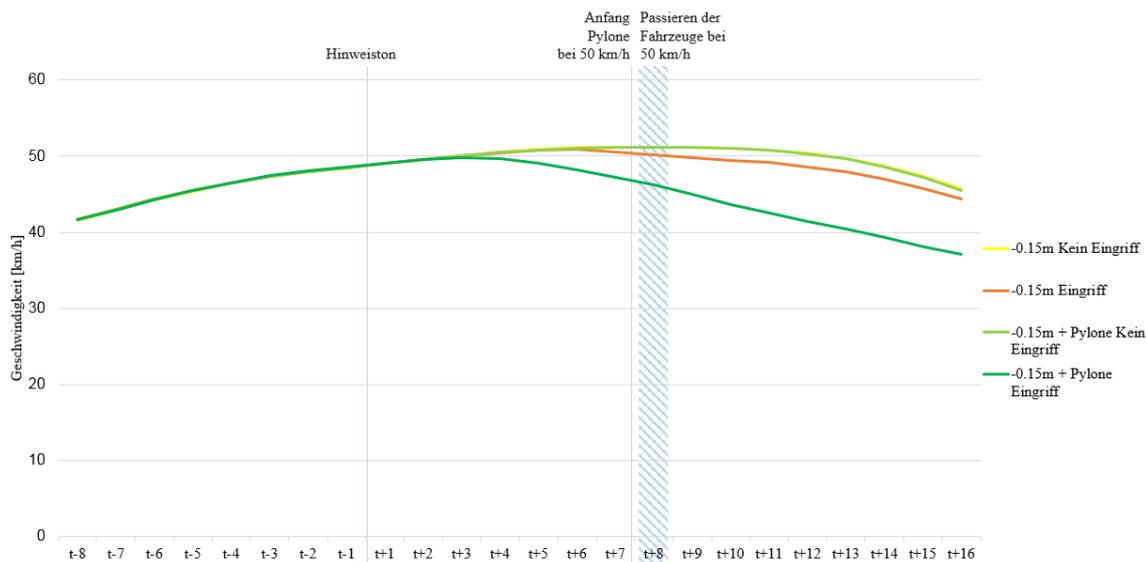


Abbildung 58. Geschwindigkeitsverlauf in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

Im Rahmen einer inferenzstatistischen Analyse wurde eine univariate ANOVA mit den UV Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Pylone), Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) und Zeitpunkt (t_{-8} bis t_{+16}) sowie der AV Geschwindigkeit durchgeführt. Die signifikanten Effekte auf Haupteffekts- und Interaktionsebene sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23

Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Geschwindigkeit im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

Effekt	F-Wert	p-Wert	η_p^2
Gegenverkehrsszenario	$F(1, 517) = 11.72$	$p < .01$	$\eta_p^2 = .022$
Eingriff	$F(1, 517) = 23.42$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .043$
Zeitpunkt	$F(23, 517) = 6.36$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .220$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff	$F(1, 517) = 11.18$	$p < .01$	$\eta_p^2 = .021$

Erneut wurden im Anschluss paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) betrachtet. Trotz fehlender Signifikanzen auf Interaktionsebene wurden diese teilweise auch unter Berücksichtigung des Zeitpunkts durchgeführt. Für den Faktor Zeitpunkt legten sie nahe, dass der signifikante Haupteffekt dieses Faktors vor allem auch durch die noch steigende Geschwindigkeit vor dem Hinweiston zurückzuführen war. Für den Faktor Gegenverkehrsszenario zeigten die paarweisen Vergleiche, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Szenarien nur bei Eingriff und in diesem Fall ab t_{+8}

(d. h. 4 s nach dem Hinweiston; vgl. Studie 5: ca. 2.6 s nach dem Hinweiston, s. Kapitel 8.3.2.7) zu finden war ($p < .05$). D. h., im Falle eines Eingriffs reduzierten die Versuchspersonen im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone signifikant stärker die Geschwindigkeit. Weiterhin gab es im Szenario Abstand -0.15 m keine signifikanten Unterschiede für die Gruppen mit und ohne Eingriff. D. h., bei einem Eingriff reduzierten Fahrerinnen und Fahrer hier nicht signifikant die Geschwindigkeit. Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone gab es gleichwohl ab t_{+9} , d. h. ca. 4.5 s nach dem Hinweiston signifikante Unterschiede in der Geschwindigkeit zwischen Versuchspersonen mit und ohne Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung ($p < .05$) (vgl. Studie 5: ca. 2.6 s nach dem Hinweiston, s. Kapitel 8.3.2.7). Demnach wurden die Fahrerinnen und Fahrer bei einem Eingriff in diesem Szenario signifikant langsamer.

Wie in Studie 5 wurden zur Identifikation möglicher nicht optimaler oder sicherheitskritischer Verhaltensmuster anschließend die Einzeltrajektorien der Versuchspersonen mit Eingriff betrachtet (Abbildung 59 für Abstand -0.15 m und Abbildung 60 für Abstand -0.15 m + Pylone). Die gemittelten Geschwindigkeitsverläufe unterstützend zeigen Abbildung 59 und Abbildung 60, dass im Vergleich der beiden Szenarien in Abstand -0.15 m + Pylone öfter und stärker gebremst wurde. Allerdings kam keine der Versuchspersonen zum vollständigen Stillstand. Die stärkste Reduzierung der Geschwindigkeit einer Versuchsperson war auf 20 km/h. Das nicht optimale Verhalten, das 10 % der Teilnehmenden in Studie 5 zeigte (s. Kapitel 8.3.2.7), konnte in der Realstudie also nicht repliziert werden. Folglich konnte zwar die Komfortrelevanz des Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes (unangenehme/kritische Bewertung) bestätigt werden, es ist allerdings schwierig, auf die Sicherheitsrelevanz desselben zu schließen.

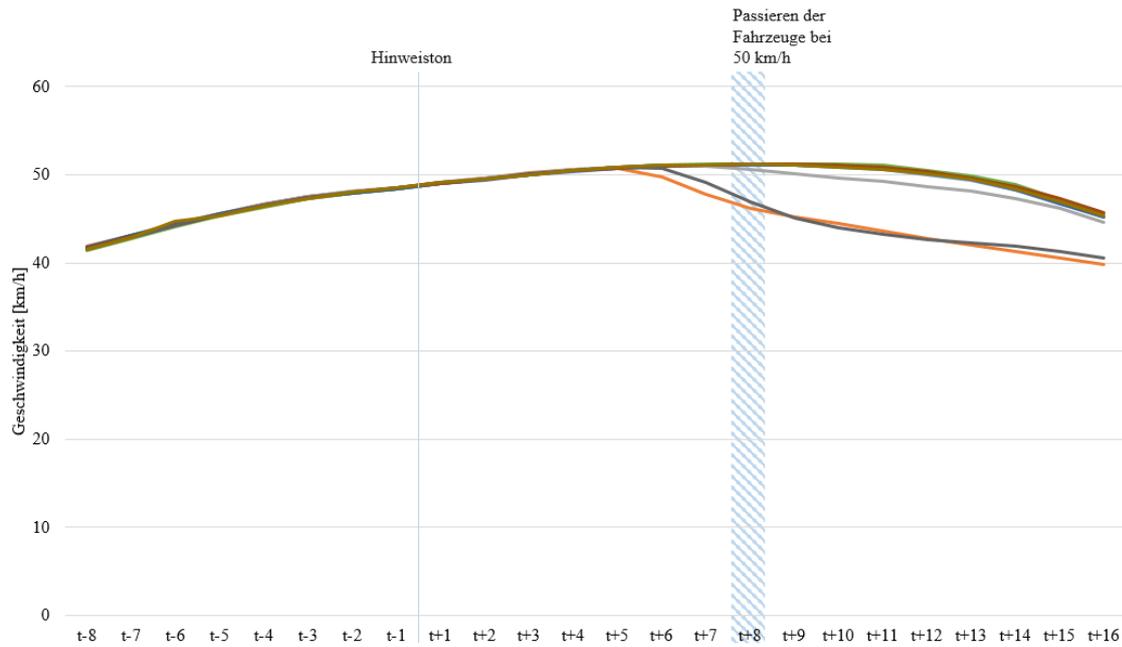


Abbildung 59. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

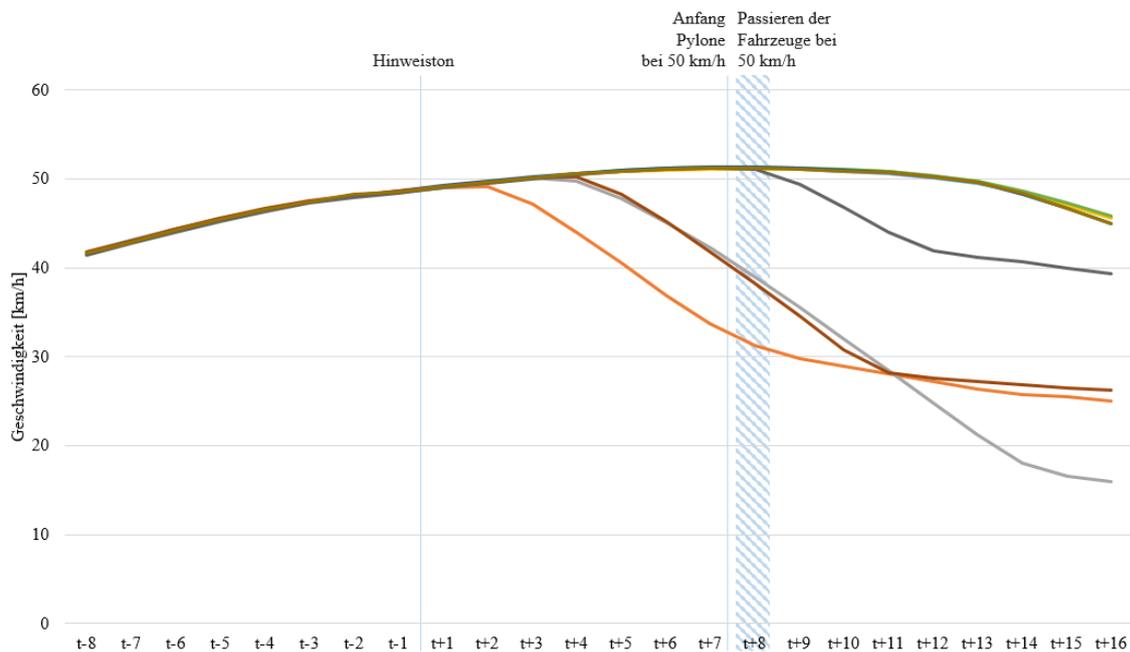


Abbildung 60. Einzeltrajektorien der Geschwindigkeit im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

9.3.2.8. Lateralversatz. Schließlich wurde auch in Studie 6 der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs als AV ausgewertet. Abbildung 61 zeigt den Lateralversatz in den

zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff.

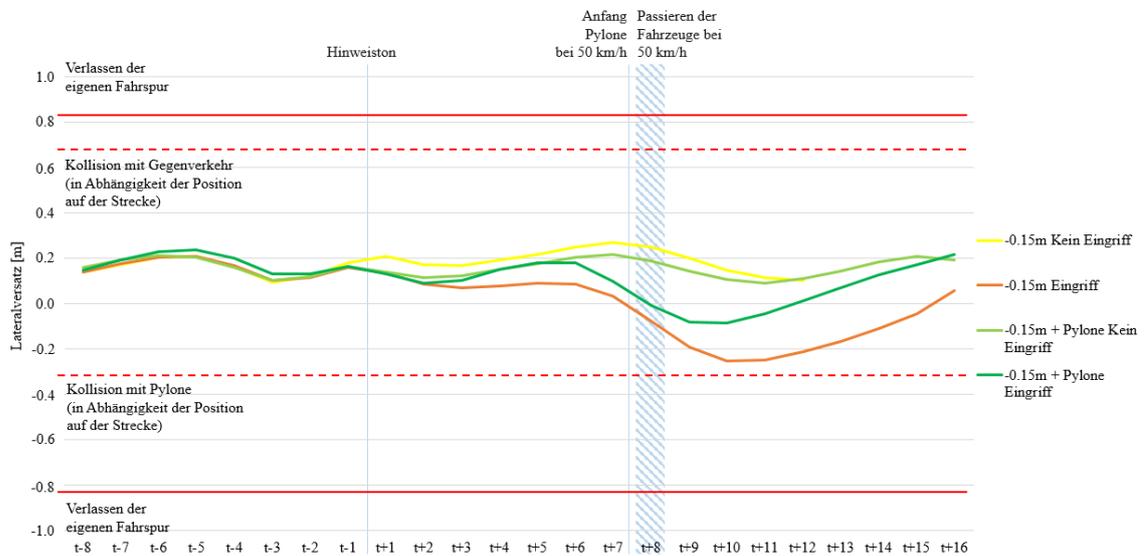


Abbildung 61. Lateralversatz in den zwei kritischen Gegenverkehrsszenarien (Abstand -0.15 m und -0.15 m + Pylone) bei keinem Eingriff und Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

Zur inferenzstatistischen Untersuchung wurde eine univariate ANOVA mit den UV Gegenverkehrsszenario (Abstand -0.15 m, Abstand -0.15 m + Pylone), Eingriff (kein Eingriff, Eingriff) und Zeitpunkt (t-8 bis t+16) berechnet. Der Lateralversatz des Ego-Fahrzeugs stellte die AV dar. In Tabelle 24 sind die signifikanten Haupteffekte und Interaktionen zusammengefasst.

Tabelle 24

Signifikante Effekte der univariaten ANOVA für die AV Lateralversatz im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

Effekt	F-Wert	p-Wert	η_p^2
Gegenverkehrsszenario	$F(1, 517) = 10.56$	$p < .01$	$\eta_p^2 = .020$
Eingriff	$F(1, 517) = 68.88$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .119$
Zeitpunkt	$F(23, 517) = 6.31$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .219$
Gegenverkehrsszenario*Eingriff	$F(1, 517) = 19.97$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .037$
Eingriff*Zeitpunkt	$F(23, 517) = 3.60$	$p < .001$	$\eta_p^2 = .138$

Es folgten angeschlossene paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert), die trotz fehlender Signifikanzen des Zeitpunkts auf Interaktionsebene auch diesen Faktor berücksichtigten. Sie ergaben, dass sich der Lateralversatz insgesamt zwischen t+10 und

t_{+12} veränderte (im Vergleich zu t_{-1} vor dem Hinweiston). Außerdem unterschieden sich die zwei Gegenverkehrsszenarien im Falle eines Eingriffs signifikant ab t_{+10} voneinander ($p < .05$). Im Szenario ohne Pylone wichen die Versuchspersonen stärker aus. Zudem hatten Teilnehmende der Gruppen Eingriff bzw. kein Eingriff im Szenario Abstand -0.15 m zwischen t_{+6} und t_{+15} einen signifikant unterschiedlichen Lateralversatz ($p < .05$). Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone lag dieser signifikante Unterschied zwischen Eingriff und kein Eingriff zwischen t_{+8} und t_{+10} ($p < .05$). Im Falle eines Eingriffs wichen Fahrerinnen und Fahrer also eine Sekunde vor Passieren der Fahrzeuge (Abstand -0.15 m) bzw. bei Passieren der Fahrzeuge (Abstand -0.15 m + Pylone) signifikant nach rechts aus (vgl. Studie 5 eine bzw. zwei Sekunden vor Passieren der Fahrzeuge, s. Kapitel 8.3.2.8).

Zur detaillierteren Untersuchung dieses Ausweichverhaltens wurden die Einzeltrajektorien der Versuchspersonen mit Eingriff betrachtet (Abbildung 62 für Abstand -0.15 m und Abbildung 63 für Abstand -0.15 m + Pylone). Passend zu den gemittelten Plots und der univariaten ANOVA zeigen die Diagramme der Einzeltrajektorien, dass Versuchspersonen im Szenario Abstand -0.15 m stärker nach rechts auswichen. Folglich besteht eine Ähnlichkeit zwischen den Trajektorienmustern der Studien 5 und 6 (s. Kapitel 8.3.2.8). Allerdings beging in der aktuellen Realstudie keine der Versuchspersonen einen Fahrfehler in der Querregelung (vgl. 10 % der Teilnehmenden in Studie 5, s. Kapitel 8.3.2.8). Zwar deuten die Fahrdaten im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone auf eine Kollision einer Versuchsperson mit den Pylonen hin, tatsächlich trat diese nicht auf. Als mögliche Begründung können minimale Ungenauigkeiten im Versuchsaufbau (z. B. geringe Varianz in der Position der Pylonen durch Auf-/Abbau des Szenarios) und im GPS (d. h. geringe Unterschiede zwischen der tatsächlichen Fahrzeugposition und den Angaben des GPS-Systems) angeführt werden. Folglich kann bei diesem $n = 1$ Fall besser von einem Beinahe-Unfall gesprochen werden. Wie für die Geschwindigkeit ist also vor allem die Komfortrelevanz des Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes nachweisbar. Die Sicherheitsrelevanz zeigte sich nur für die $n = 1$ Versuchsperson, die den Beinahe-Unfall verursachte und somit die Situation im Vergleich zum automatisierten System schlechter löste.

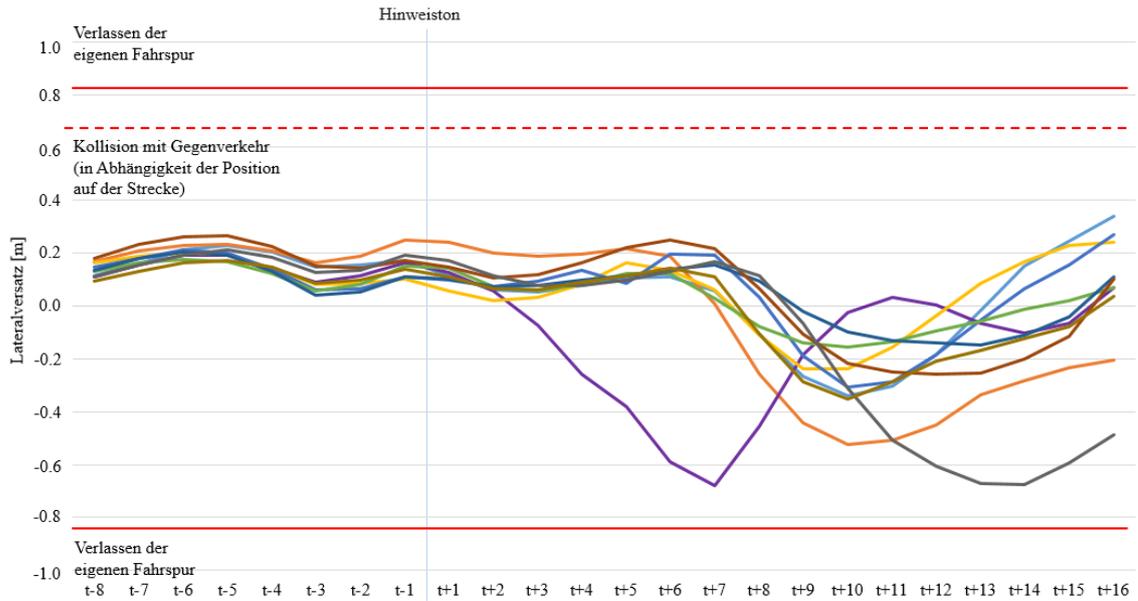


Abbildung 62. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

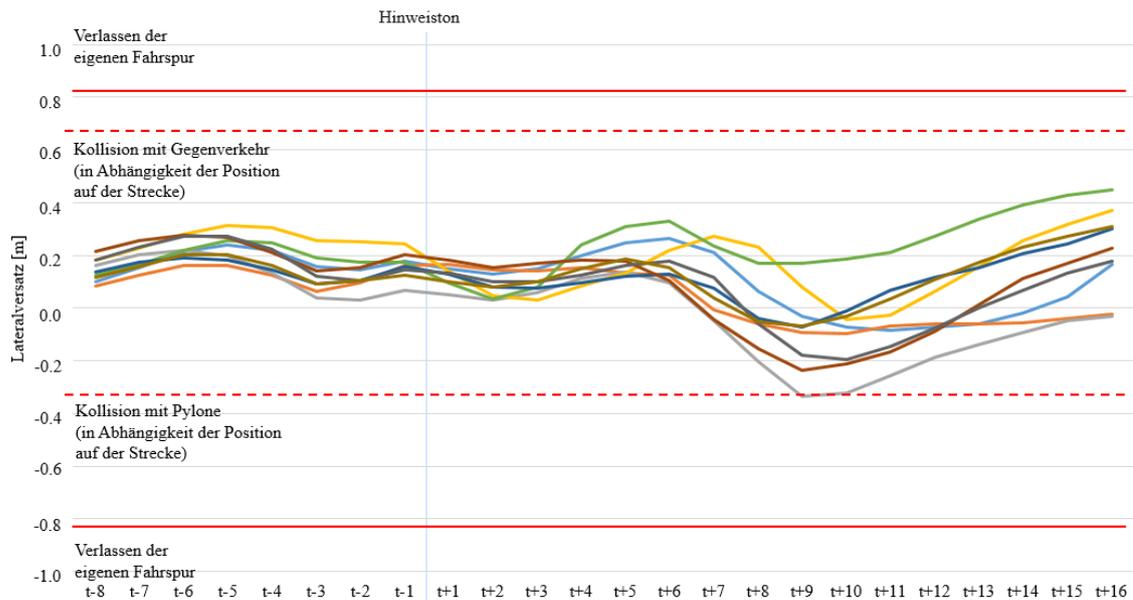


Abbildung 63. Einzeltrajektorien des Lateralversatzes im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff im Studienteil 2 der Realstudie (Studie 6)

9.3.2.9. Vergleich der drei Objektivparameter. Wie in Studie 5 fand zum Abschluss der Analyse der Objektivdaten ein deskriptiver Vergleich der drei Objektivparameter statt. Ziel war erneut, ein Verständnis über den zeitlichen Ablauf funktionaler

Verhaltensanpassungen zu gewinnen. Im Folgenden sind deshalb die aus den Analysen der drei Parameter jeweils als relevant erachteten Vergleiche zusammengestellt.

Für die SuRT ließen sich auf inferenzstatistischer Ebene keine signifikanten Reduktionen der Aktivität finden. Auf deskriptiver Basis fand allerdings in allen Gegenverkehrsszenarien unabhängig des Eingriffsverhaltens eine Anpassung ca. ab t_{+1} bzw. t_{+2} (d. h. 0.5-1 s nach dem Hinweiston) statt (s. Kapitel 9.3.2.6). Wie in Studie 5 zeigte sich anschließend ein ähnliches Verhalten in der Wiederaufnahme der FFT-Bearbeitung. Im unkritischen Szenario kam es zu t_{+7} (d. h. noch vor Passieren der Fahrzeuge und ca. 2.5 s nach der ersten Reduktion) zu einer Erhöhung der FFT-Aktivität. In den kritischen Szenarien ohne Eingriff kam es ebenfalls zu einer, zum Teil späteren, Erhöhung (Abstand -0.15 m: t_{+5} und Abstand -0.15 m + Pylone: t_{+12}). Falls in den kritischen Szenarien eingegriffen wurde, kam es zu keiner klaren Erhöhung der FFT-Bearbeitung.

Wie in Studie 5 zeigten sich signifikante Anpassungen in den beiden Fahrparametern erst später im Zeitverlauf (s. Kapitel 9.3.2.7 und 9.3.2.8). Im Szenario Abstand -0.15 m gab es im Vergleich der Fälle mit und ohne Eingriff wie in Studie 5 zwar keine signifikanten Anpassungen in der Geschwindigkeit, die Lateralposition wurde allerdings ab t_{+6} (d. h. ca. 3 s nach dem Hinweiston und somit ca. 2-2.5 s nach der ersten Reduktion der SuRT) signifikant angepasst. Die Zeitspanne zwischen FFT-Reduktion und Anpassungen in der Fahraufgabe war somit im Vergleich zu Studie 5 ähnlich. Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone gab es zu t_{+8} eine signifikante Anpassung der Lateralposition und zu t_{+9} eine signifikante Geschwindigkeitsreduktion (d. h. ca. 4 bzw. 4.5 s nach dem Hinweiston und somit ca. 3-4 s nach der ersten Reduktion der SuRT). Die Zeitspanne zwischen FFT-Reduktion und Anpassungen in der Fahraufgabe war somit im Vergleich zu Studie 5 ca. 2-2.5 s länger.

9.4. Diskussion

Zum Abschluss des empirischen Teils der vorliegenden Dissertation und ausgehend von den methodischen Reflexionen der vorherigen zwei Studien (s. Kapitel 7.4 und Kapitel 8.3.3) strebte die Studie 6 die Verifikation der erlangten Ergebnisse im Realversuch an, der sich in zwei Studienteile aufgliederte. Im Folgenden wird zunächst jeweils auf die Hypothesenbeantwortung pro Studienteil eingegangen und die Bedeutung der Ergebnisse für die funktionalen Verhaltensanpassungen besprochen. Anschlie-

ßend folgt eine inhaltliche und methodische Diskussion für beide Studienteile, in der u. a. die Auslegung automatisierter Systeme diskutiert wird.

Im ersten Studienteil wurde die Fragestellung untersucht, ob die in Studie 4 bestimmten Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes neben der Fahrsimulation (s. Studie 5) auch im Realversuch bestätigt werden können und somit eine Praxisrelevanz besitzen. Vergleichbar zur Vorstudie der Studie 5 (s. Kapitel 8.2) wurde diese Fragestellung im Rahmen zweier Hypothesen konkretisiert. Die Hypothese H1 lautete:

H1: Automatisierte Trajektorien, die unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Realversuch in den Fahrszenarien der Studie 4 als angemessen bzw. angenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben keinen Eingriffswunsch.

Die Subjektivbewertungen des Studienteils 1 bestätigen diese Hypothese. Beide Lateralversätze, die unterhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts lagen (0.0 m und 0.2 m), wurden von den Versuchspersonen als angemessen und angenehm bewertet. Es wurde kein Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung berichtet (s. Abbildung 51-Abbildung 53).

Komplementär wurde die folgende Hypothese H2 für Trajektorien, die über dem in Studie 4 bestimmten Schwellenwert liegen, geprüft:

H2: Automatisierte Trajektorien, die oberhalb des in Studie 4 bestimmten Schwellenwerts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes liegen, werden auch im Realversuch in den Fahrszenarien der Studie 4 als nicht angemessen bzw. unangenehm bewertet. Fahrerinnen und Fahrer haben einen Eingriffswunsch.

Hier konnten die Studienergebnisse nur in Abhängigkeit der Bewertungsskala Bestätigung für die Hypothese liefern. Der Lateralversatz von 0.4 m wurde eher als angemessen bewertet (Abbildung 51). Auch beabsichtigte ein Großteil der Versuchspersonen keinen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung (Abbildung 52). Somit muss die Hypothese H2 für diesen Lateralversatz und diese Subjektivratings abgelehnt werden. Auch der nochmals höhere Lateralversatz von 0.6 m wurde eher als angemessen bewertet (Abbildung 51). Allerdings gab hier die Hälfte der Stichprobe an, in die Fahrzeugführung eingreifen zu wollen (Abbildung 52). Somit konnte die Hypothese für die-

sen Lateralversatz nur für den Eingriffswunsch, nicht aber für die Angemessenheitsbewertung bestätigt werden. Auf der Komfort-Sicherheits-Skala wurden beide Lateralversätze oberhalb des Schwellenwerts als eher unangemessen bewertet (Abbildung 53). Somit kann die Hypothese für diese Skala für beide Lateralversätze bestätigt werden.

Bezogen auf das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) lässt sich gemäß diesen Ergebnissen schlussfolgern, dass auch in einer Realfahrt des automatisierten Fahrens eine subjektive Fahrleistungsbewertung stattfindet und auch in diesem realitätsnahen Szenario Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes bestimmt werden können. Allerdings sei vor dem Hintergrund der in Studie 6 angestrebten Validierung der Forschungsmethodik der vorherigen Studien erwähnt, dass die Fahrleistungsschwelle in der Realfahrt lediglich für die Komfort-Sicherheits-Skala der der Online-Studie entsprach. Für die anderen beiden Skalen (Angemessenheit und Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung) schien der Schwellenwert in der Realfahrt höher zu liegen. D. h., es wurden höhere Versätze nach links akzeptiert. Hinsichtlich einer Realfahrt kann also geschlussfolgert werden, dass eine Online-Studie nur für bestimmte subjektive Bewertungsskalen vergleichbare Schlussfolgerungen liefern kann.

Während der Fokus im Studienteil 1 auf der Verifikation der Ergebnisse zu den Schwellenwerten einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes lag, konzentrierte sich der Studienteil 2 auf die confirmatorische Überprüfung der in Studie 5 diskutierten Handlungsrelevanz der Schwellenwerte. Analog zur Hauptstudie der Studie 5 lautete eine H3:

H3: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt nicht überschritten wird, greifen Fahrerinnen und Fahrer auch im Realversuch nicht in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als angemessen und angenehm.

Wie in Studie 5 bestätigen auch hier die empirischen Ergebnisse die Hypothese. Laut den Subjektivbewertungen wurde die Ego-Trajektorie in allen drei Szenarien vor Erscheinen des Gegenverkehrs (d. h. als zusätzliches Szenario aus Studie 4 bzw. 5 ohne Gegenverkehr) als angemessen und angenehm bewertet. Dies veränderte sich im unkritischen Baseline-Szenario, in dem der Schwellenwert nicht überschritten wurde, nicht (s. Abbildung 54 und Abbildung 55). Weiterhin berichteten die Versuchspersonen größ-

tenteils keine Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung, was sich auch mit den Objektivdaten der Fahraufgabe deckte (Tabelle 21 und Tabelle 22). Gleichwohl zeigte sich wie in Studie 5 ca. 0.5-1 s nach dem Hinweiston eine Reduktion der FFT. Anschließend erhöhte sich die Aktivität noch vor Passieren der Fahrzeuge (s. Abbildung 57). Die Bedeutung dieser Ergebnisse für die Praxisrelevanz der funktionalen Verhaltensanpassungen nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) wird im Kapitelverlauf zusammen mit den Befunden zu Hypothese H4 dargelegt.

Komplementär zur Hypothese H3, beschäftigte sich Hypothese H4 mit dem Fall, dass der Schwellenwert der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes überschritten wurde. Diese Überschreitung wurde erneut über das Erscheinen des Gegenverkehrs, der die Fahrbahnmitte überschritt (kritische Szenarios: Abstand -0.15 m und Abstand -0.15 + Pylone), operationalisiert:

H4: Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in einer automatisierten Fahrt überschritten wird, reduzieren Fahrerinnen und Fahrer auch im Realversuch proaktiv die FFT und greifen in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Sie bewerten die automatisierte Trajektorie des Ego-Fahrzeugs als nicht angemessen und unangenehm.

Auch diese Hypothese H4 kann gemäß den empirischen Studienergebnissen angenommen werden. Die Hälfte (Abstand -0.15 m) bzw. ca. 2/3 (Abstand -0.15 m + Pylone) der Versuchspersonen bewerteten die Ego-Trajektorie ab Erscheinen des Gegenverkehrs als nicht angemessen (Abbildung 54). Vergleichbar wurde die Fahrt ab diesem Zeitpunkt als unangenehm (Abstand -0.15 m) bzw. als kritisch (Abstand -0.15 m + Pylone) bewertet (Abbildung 55). Darüber hinaus berichteten ca. jeweils 2/3 der Stichprobe einen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung. Im Szenario Abstand -0.15 m wurden insbesondere Lenkbewegungen berichtet, im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone sowohl Lenk- als auch Bremseneingriffe (s. Tabelle 37 und Tabelle 39). Erneut sei deshalb an dieser Stelle auf die Unterscheidung subjektiver und objektiver Sicherheitsschwellen hinzuweisen. Es bestand ein subjektiver Eingriffswunsch, obwohl objektiv bei aktiver Automation kein Unfall zu erwarten war.

Die Objektivparameter können diese Aussage unterstützen und erweitern. Hinsichtlich des Lateralversatzes konnten in beiden Szenarien signifikante Ausweichmanöver nach rechts detektiert werden, die eine Sekunde vor (Abstand -0.15 m) bzw. bei (Abstand -0.15 m + Pylone) Passieren der Fahrzeuge stattfanden (s. Abbildung 61). Es

konnten allerdings keine Fahrfehler (Verlassen des eigenen Fahrstreifens, Kollisionen) festgestellt werden. Lediglich eine Versuchsperson verursachte einen Beinahe-Unfall (Abbildung 62 und Abbildung 63). Im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bremste darüber hinaus die Hälfte der Stichprobe signifikant, sodass sich die beiden Szenarien zum Zeitpunkt des Passierens der Fahrzeuge signifikant voneinander unterschieden (Abbildung 58). Es wurde jedoch kein nicht-optimales Verhalten (vollständiges Abbremsen) verzeichnet (Abbildung 59 und Abbildung 60).

Wie auch in Studie 5 wurde als dritter Objektivparameter die FFT-Aktivität untersucht. Die Verlaufskurven deuteten erneut, wie auch bei dem in Hypothese H3 berichteten unkritischen Szenario, auf einen proaktiven Handlungsmechanismus hin. Nach dem Hinweiston wurde in beiden kritischen Szenarien zunächst die FFT-Aktivität reduziert. Anschließend fand eine Wiedererhöhung der Aktivität in Abhängigkeit des Übernahmeverhaltens (kein Eingriff vs. Eingriff) statt. In den kritischen Szenarien ohne Eingriff erhöhte sich die Aktivität wieder. In den kritischen Szenarien, in denen eingegriffen wurde, fand hingegen keine Wiedererhöhung der Aktivität statt (s. Abbildung 57).

Die Ergebnisse der Hypothesen H3 und H4 der Studie 6 sprechen somit zusammen für das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) und den darin angenommenen Zusammenhang zwischen der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbewertung und der Auslösung kompensativer Handlungen im Kontext des automatisierten Fahrens. Der in Studie 5 diskutierte Ablauf der funktionalen Verhaltensanpassungen im Sinne einer Handlungskaskade des supervisory controllers und dessen drei mögliche Zustände (klarer Nicht-Eingriff, „Hab-Acht“-Stellung und klarer Eingriff, s. Kapitel 8.3.3) konnte auch in der Realfahrt des automatisierten Fahrens bestätigt werden. Die Ergebnisse der Studie 5 erscheinen folglich valide. So schienen die Versuchspersonen auch in der Realfahrt die FFT vor einer potenziell kritischen Fahrsituation (Überschreitung des Schwellenwerts) zu reduzieren, um über die Pfade 1 und 3 des Modells Ressourcen zur Lösung der Fahraufgabe bereitzustellen. Ähnlich zu Studie 5 nahm die Aktivierung dieses Handlungsschrittes ca. 0.5-1 s in Anspruch. Anschließend wurde je nach Subjektivbewertung und Kritikalität des Szenarios in die Fahrzeugführung eingegriffen. Bei keinem Eingriff versuchten die Versuchspersonen, über eine teils verzögerte Wiederaufnahme der FFT ein mittleres Arousallevel wiederherzustellen. Bei einem Eingriff fand keine Wiederaufnahme der FFT statt, da die (kognitiven) Ressourcen für die Fahraufgabe genutzt werden mussten. Dieser zweite Handlungsschritt nahm

im Vergleich zu Studie 5 je nach Szenario ähnlich bzw. leicht mehr Zeit in Anspruch (Abstand -0.15 m: 2-2.5 s; Abstand -0.15 m + Pylone: 3-4 s).

Diese empirischen Erkenntnisse bzw. deren Übereinstimmungen mit den Schlussfolgerungen aus Studie 5 erlauben die Bekräftigung der in der Fahrstudie gemachten Überlegungen zur Auslegung automatisierter Systeme (s. Kapitel 8.3.3). Gemäß der Realfahrtsstudie scheinen die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes vor allem eine Komfortrelevanz zu haben. Fahrerinnen und Fahrer bewerteten Trajektorien oberhalb des Schwellenwerts als nicht angemessen und griffen in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Allerdings konnte nicht direkt die Sicherheitsrelevanz bestätigt werden. Außer einem Beinahe-Unfall begingen die Versuchspersonen im Falle eines Eingriffs keine Fahrfehler. Ausgehend von der Idee, dass aber bereits eine Komfortrelevanz Einfluss auf die Nutzerakzeptanz automatisierter Fahrfunktionen hat, sollten automatisierte Systeme trotzdem adaptive Mechanismen in der Trajektorienplanung vorsehen. Diese könnten die automatisierte Fahrt jederzeit den aktuellen bzw. erwarteten Situationsumständen anpassen. Auch die anderen beiden Überlegungen zur Auslegung automatisierter Systeme aus Studie 5 (Systemanzeige und Überwachung FFT-Aktivität) erscheinen basierend auf den Ergebnissen plausibel.

Zum Abschluss der Diskussion der Ergebnisse der Studie 6 lassen sich noch, obwohl viele wichtige Schlussfolgerungen abgeleitet werden konnten, einige methodische Details kritisch reflektieren. So kann wie in Studie 5 hinterfragt werden, inwiefern die unterschiedlichen Verhaltensweisen zwischen den Szenarien auf eine unterschiedliche Wahrnehmung der Ego-Trajektorie zurückzuführen seien. Da die Bewertung vor Erscheinen des Gegenverkehrs zwischen den Szenarien jedoch gleich ausfiel (s. Abbildung 54), kann dieser Kritikpunkt ausgeräumt werden. Weiterhin betrifft die Methodenkritik insbesondere die Stichprobengröße. Die kleine Versuchspersonenanzahl in der aktuellen Studie könnte eventuell zu fehlenden Signifikanzen oder Datenartefakten aufgrund einer hohen Varianz geführt haben. Drittens sollte insbesondere die Verwendung eines Balloon-Cars als Gegenverkehr diskutiert werden. Ein Fahrzeug aus Kunststoff, welches sich nicht bewegte, könnte unter Umständen einen starken Einfluss auf die Wahrnehmung der Teilnehmenden gehabt haben. Es ist anzunehmen, dass in einer realen Situation, in der der Gegenverkehr (a) ein massives Hindernis darstellt und (b) sich bewegt, ein anderes Fahrerverhalten zu erwarten wäre. Inwiefern vor allem diese letzten

beiden Punkte in zukünftigen Studien berücksichtigt werden sollten, wird im Ausblick (Kapitel 11.1) besprochen.

10. Generelle Diskussion

Während des Fahrens bearbeiten Fahrerinnen und Fahrer in ca. 50 % der Zeit zusätzliche FFT (z. B. Dingus et al., 2006; Huemer & Vollrath, 2012). Da die menschlichen Kognitionsressourcen begrenzt sind (Kahneman, 1973; Wickens, 2008) und die Fahraufgabe an sich bereits hoch anspruchsvoll ist, kann diese Mehrfachaufgabenbearbeitung zu einem Ressourcenkonflikt führen. In der Literatur werden die negativen Auswirkungen dieses Konflikts (d. h. Fahrfehler bzw. Unfälle) unter dem Begriff der *driver distraction* diskutiert (s. Kapitel 2.3). Trotz dieser nachgewiesenen negativen Konsequenzen zeigen Unfallstatistiken aber auch, dass schwere Unfälle mit Verunglückten relativ selten passieren (ADAC, n.d.a; n.d.b). Folglich scheinen Fahrerinnen und Fahrer Fähigkeiten zu besitzen, die es ihnen auch im Mehrfachaufgabenkontext erlauben, ihre kognitiven Ressourcen zu regulieren und eine sichere Fahrleistung zu garantieren. Diese Fähigkeiten werden in der Literatur als regulatives Fahrerverhalten diskutiert und wurden von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) im Arbeitsmodell der funktionalen Verhaltensanpassungen konzeptualisiert (s. Kapitel 2.4.1.4). Unter Bezugnahme auf dieses Arbeitsmodell, bestehende empirische Forschung und die Entwicklungen des automatisierten Fahrens (s. Kapitel 2.6) wurden in der Dissertation drei zentrale offene Forschungsfelder identifiziert.

Erstens wurde ausgehend von der möglichen Abwendung von der Fahraufgabe im automatisierten Fahren (ab SAE Level 3; SAE International, 2018) und dem damit verbundenen, reduzierten Situationsbewusstsein, die Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen in Übernahmesituationen des automatisierten Fahrens diskutiert. Voß und Schwalm (2015, s. Kapitel 2.6.3) stellten hierzu theoriebasierte Annahmen an, die empirisch zu prüfen waren. Zweitens wurde als zentrale Komponente des Arbeitsmodells und möglicher Auslöser regulativer Handlungen die subjektive Fahrleistungsbewertung hervorgehoben. Neben der Erarbeitung eines ganzheitlichen Faktorenkonstrukts sowie einer entsprechenden Messmethodik wurde die Bestimmung von Fahrleistungszielwerten, deren Einflussfaktoren und deren Rolle für den Fahrkomfort im automatisierten Fahren diskutiert. Drittens wurde, in Verbindung der ersten beiden Punkte, die Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen durch das Abweichen von den subjektiven Fahrleistungszielwerten genannt. Vor allem vor dem Hintergrund des automatisierten Fahrens und des dort reduzierten Situationsbewusstseins sowie den Überlegun-

gen von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3) wurde die Klärung der Sicherheitsrelevanz eines solchen Zusammenhangs unterstrichen.

Die vorliegende Dissertation nahm sich diesen offenen Forschungsfeldern an. Zusammengefasst wurde die Zielsetzung (a) der theoriebasierten und empirischen Ausarbeitung ausgewählter Komponenten der von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) postulierten funktionalen Verhaltensanpassungen zur Unfallvermeidung sowie (b) der spezifischen Untersuchung der Verfügbarkeit und Ausprägung derselben im Rahmen des automatisierten Fahrens verfolgt. Zu diesem Zweck wurden sechs empirische Studien durchgeführt. Nachfolgend wird in Kapitel 10.1 ein Überblick über die in den sechs Studien untersuchten Komponenten des Arbeitsmodells sowie über die jeweiligen empirischen Erkenntnisse gegeben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 10.2 eine kritische Reflexion der gewählten Forschungsmethodik vorgenommen.

10.1. Überblick empirische Studien und Bedeutung der Ergebnisse für die Zielsetzung der Arbeit

Zur Untersuchung der drei offenen Forschungsfelder und zum Erreichen der Zielsetzung der Arbeit wurden im Rahmen der Dissertation sechs empirische Studien durchgeführt. Abbildung 8 in Kapitel 3.2 beinhaltet eine Übersicht der pro Studie untersuchten Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015). In den drei folgenden Unterkapiteln wird für jede in dieser Abbildung farblich hervorgehobene Komponente vorgestellt, welche Ergebnisse die Studien liefern konnten. In Kapitel 10.1.1 werden die funktionalen Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die Situationswahrnehmung und -antizipation im automatisierten Fahren (s. Abbildung 8, grüne Hervorhebung; erstes offenes Forschungsfeld) diskutiert. Kapitel 10.1.2 beinhaltet die Schlussfolgerungen zur subjektiven Fahrleistungsbewertung (s. Abbildung 8, rote Hervorhebung; zweites offenes Forschungsfeld). Abschließend werden in Kapitel 10.1.3 die Ergebnisse zu den funktionalen Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die subjektive Fahrleistungsbewertung im automatisierten Fahren (s. Abbildung 8, blaue Hervorhebung; drittes offenes Forschungsfeld) reflektiert.

10.1.1. Funktionale Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die Situationswahrnehmung und -antizipation im automatisierten Fahren. Ein erster Themenschwerpunkt der Dissertation lag auf der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassun-

gen durch die Wahrnehmung und Antizipation einer sich verändernden Fahrsituation im Kontext des automatisierten Fahrens (s. Abbildung 8, grüne Hervorhebung). Gemäß den Überlegungen von Voß und Schwalm (2015, s. Kapitel 2.6.3) wurde untersucht, ob Fahrerinnen und Fahrern auch im automatisierten Fahren im Falle von systeminitiierten Übernahmen die funktionalen Verhaltensmechanismen zur Gewährleistung einer sicheren Fahrleistung trotz einer reduzierten Involvierung in die Fahraufgabe zur Verfügung stehen.

Studie 1, die im statischen Fahrsimulator durchgeführt wurde, untersuchte diesen Aspekt, indem die sich verändernde Fahrsituation über eine Übernahme vom automatisierten zum nicht-automatisierten Fahren operationalisiert wurde. Die empirischen Ergebnisse konnten zeigen, dass Fahrerinnen und Fahrer im automatisierten Fahren, in dem die Belastung und Beanspruchung durch das Wegfallen der Situationsfaktoren der Fahraufgabe reduziert war, zunächst die FFT-Bearbeitung erhöhten, um ein mittleres Arousallevel beizubehalten. Zur Vermeidung einer Überbelastung im Falle einer Übernahmesituation, in der die Situationsfaktoren der Fahraufgabe wieder hinzukämen, aktivierten Fahrerinnen und Fahrer anschließend ihre funktionalen Verhaltensanpassungen auf den Pfaden 1 und 3 des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015). In Vorbereitung auf die Übernahme fand eine proaktive Reduktion der FFT-Ziele und Aktivität auf das Niveau einer nicht-automatisierten Fahrt statt. Hierüber gaben die Fahrerinnen und Fahrer (kognitive) Ressourcen frei, die für das sichere Lösen der Fahraufgabe nach der Übernahme benötigt wurden. Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dieser FFT-Reduktion und der Übernahmeleistung gefunden werden.

Somit konnte Studie 1 im automatisierten Fahren Nachweis für die funktionalen Verhaltensanpassungen basierend auf der Situationswahrnehmung und -antizipation erbringen. Die theoriebasierten Überlegungen von Voß und Schwalm (2015) konnten empirisch unterstützt werden.

10.1.2. Subjektive Fahrleistungsbewertung. Für die zweite zu untersuchende Komponente, die subjektive Fahrleistungsbewertung (s. Abbildung 8, rote Hervorhebung) als zentrales Vergleichskriterium des supervisory controllers und möglicher Auslöser funktionaler Verhaltensanpassungen, wurden im Rahmen der Dissertation ausgehend von den offenen Forschungsfeldern zwei Schwerpunkte gelegt.

Der erste Schwerpunkt, die Erarbeitung eines ganzheitlichen Konstrukts für Längs- und Querführung sowie die Ableitung einer zugehörigen Messmethodik, wurde in Studie 2 betrachtet. Die Ergebnisse einer Literaturrecherche, diverser Online-Studien sowie Card-Sortings wurden zur diskriminanz- und faktorenanalytischen Untersuchung des Konstrukts einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung genutzt. Es ergab sich ein einfaktorielles Konzept, welches die semantischen Kategorien des Komforts und der Sicherheit beinhaltet. Diese waren sprachlich zwar trennbar, hingen in der Bewertung einer Fahrleistung jedoch unweigerlich zusammen (geringe Sicherheit führt zu geringem Komfort). Bezogen auf das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) scheint der supervisory controller folglich diese beiden Dimensionen im Abgleich einer aktuellen Fahrleistung mit Zielwerten zu berücksichtigen. Zur Erfassung einer solchen subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung wurde in Studie 2 darüber hinaus ein Fragebogen inklusive der Items, des Skalenformats und einer Auswertungslogik abgeleitet. Dieser Fragebogen wurde in Studie 3 initial validiert.

Der zweite Schwerpunkt in der Komponente der subjektiven Fahrleistungsbeurteilung lag auf der Bestimmung von Schwellenwerten einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes sowie der Untersuchung möglicher Einflussfaktoren (Personen- und Situationsfaktoren) auf diese. Zunächst fanden diese Untersuchungen in Studie 3 und 4 jeweils im Rahmen einer Online-Studie statt. Dabei zeigte Studie 3, die sich nicht explizit auf das automatisierte Fahren bezog, dass insbesondere Situationsfaktoren wie der Gegenverkehr (und hier dessen Abstand von der Straßenmitte) signifikanten Einfluss auf die Lokalisation der Schwellenwerte hatten. In Studie 4, die sich explizit auf das automatisierte Fahren bezog, ergaben sich hingegen keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit der Situationsfaktoren. Dieser Unterschied zwischen dem nicht-automatisierten und automatisierten Fahren wird in der kritischen Methodenreflexion (s. Kapitel 10.2) aufgegriffen.

Anschließend wurden die Ergebnisse konfirmatorisch im statischen Fahrsimulator (Studie 5) und unter Realbedingungen auf der Teststrecke (Studie 6) geprüft. Die statische Simulatorstudie konnte diese Bestätigung zunächst erbringen. In der Realstudie konnte die Bestätigung der Ergebnisse der Studie 4 nur bedingt in Abhängigkeit der Bewertungsskala erfolgen. Außer auf der Komfort-Sicherheits-Skala schien der Schwellenwert in der Realfahrt auf den anderen Bewertungsskalen (Angemessenheit und Ein-

griffswunsch) höher zu liegen, d. h., es wurden höhere Lateralversätze akzeptiert. Die kritische Methodenreflexion wird diesen Punkt aufgreifen (s. Kapitel 10.2).

In Summe bedeuten diese Ergebnisse für das Arbeitsmodell nach Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015), dass der supervisory controller je nach Fahrmodus (nicht-automatisiertes Fahren bzw. automatisiertes Fahren) und in Abhängigkeit der Fahrsituation (vor allem hinsichtlich des Gegenverkehrs) andere Zielwerte im Abgleich der aktuellen bzw. erwarteten und der gewünschten Trajektorie heranzieht. Dabei war es in allen Fällen so, dass diese subjektiven Schwellen unterhalb eines objektiven Unfallrisikos lagen. Es scheint also einen Unterschied zwischen der psychologischen und technischen Perspektive zu geben. Diese Dialektik sollte vor allem bei der Auslegung automatisierter Fahrfunktionen zur Gewährleistung von Nutzerkomfort und -akzeptanz berücksichtigt werden. Die automatisierte Trajektorie sollte nicht nur unfallvermeidend gewählt sein, sondern sollte auch dauerhaft in den in der Dissertation identifizierten Bereichen einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung liegen. Dabei erscheint es unproblematisch, dass die Bewertung in den Online-Studien im Vergleich zur Realfahrt kritischer ausfiel. Unter Verwendung der Werte aus einer aufwandseffizienteren Online-Studie wäre sogar eher sichergestellt, dass in der Realität der subjektive Schwellenwert nicht überschritten würde. Inwiefern ein solches Überschreiten der Schwellenwerte, wie vom Arbeitsmodell angenommen, funktionale Verhaltensanpassungen auslöst, wurde als dritte Komponente in der Dissertation untersucht.

10.1.3. Funktionale Verhaltensanpassungen ausgelöst durch die subjektive Fahrleistungsbewertung im automatisierten Fahren. Als dritte Komponente wurde im Rahmen der Dissertation in den Studien 5 (statische Fahrsimulation) und 6 (Realstudie auf der Teststrecke) die theoretisch postulierte Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen durch die subjektive Fahrleistungsbewertung (s. Abbildung 8, blaue Hervorhebung) untersucht. Mit Blick auf die Zielsetzung der Dissertation wurden die empirischen Studien erneut im Kontext des automatisierten Fahrens realisiert, da insbesondere hier eine Handlungsrelevanz der subjektiven Fahrleistungsbewertung sicherheitskritisch sein könnte (Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung trotz fehlendem Situationsbewusstsein). Die Realstudie diente dabei wie zuvor der konfirmatorischen Überprüfung der Fahrsimulationsergebnisse.

Die Annahmen des Arbeitsmodells konnten durch die empirischen Ergebnisse beider Studien bestätigt und über eine zeitliche Handlungskaskade konkretisiert werden. Im Sinne eines proaktiven Handlungsmechanismus reduzierten Fahrerinnen und Fahrer, wie von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3) angenommen, vor einer potenziell subjektiv kritischen Fahrsituation die FFT-Aktivität, um (kognitive) Ressourcen für die Lösung der Fahraufgabe freizugeben. Die Initialisierung dieses Handlungsschrittes nahm gemäß den empirischen Ergebnissen der Dissertation 0.5-1.5 s in Anspruch. Anschließend zeigten sich je nach Situation drei mögliche Zustände des supervisory controllers (klarer Nicht-Eingriff, „Hab-Acht“-Stellung, klarer Eingriff). Falls der Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes nicht überschritten wurde, bestand keine Handlungsrelevanz und die Fahrerinnen und Fahrer griffen nicht oder nur vereinzelt in die automatisierte Fahrzeugführung ein. Die FFT-Aktivität wurde zur Wiederherstellung eines mittleren Arousallevels wieder erhöht (klarer Nicht-Eingriff). Die Aktivierung dieses Zustands dauerte weitere ca. 2-2.5 s. Bei Überschreitung der Fahrleistungsschwelle, zeigten sich die zwei anderen möglichen Zustände des supervisory controllers. Einerseits griffen Fahrerinnen und Fahrer zwar nicht in die Fahrzeugführung ein, erhöhten zunächst aber auch nicht die FFT-Bearbeitung. Bis zur Auflösung der potenziell kritischen Situation hielten sie die kognitiven Ressourcen für einen Eingriff vor („Hab-Acht“-Stellung). Andererseits zeigte sich eine klare Handlungsrelevanz der subjektiven Fahrleistungsbewertung. Fahrerinnen und Fahrer nahmen die FFT nicht wieder auf und griffen in die automatisierte Fahrzeugführung ein (klarer Eingriff). Diese letzte Handlungsoption nahm weitere 2-4 s in Anspruch. Dabei zeigten sich in der Realstudie (Studie 6) höhere Eingriffsraten als im Fahrsimulator (Studie 5). Über beide Studien hinweg unterschied sich das Eingriffsverhalten (Lenken vs. Bremsen) in Abhängigkeit des Fahrszenarios.

In der Simulationsstudie konnten dabei diverse Fahrfehler festgestellt werden. 10 % der Eingriffe waren sicherheitskritisch bzw. nicht optimal. Dahingegen zeigte sich in der Realstudie nur ein Beinahe-Unfall. Somit hatten die Schwellenwerte bzw. deren Überschreiten in der Fahrsimulationsstudie sowohl eine Komfort- als auch eine Sicherheitsrelevanz. Die Realstudie konnte vor allem die Komfortrelevanz bestätigen. Kapitel 10.2 wird darauf eingehen, inwiefern diese Unterschiede auf die Studienmethodik zurückzuführen sind. Hinsichtlich der Praxisrelevanz (z. B. für die Auslegung automatisierter Fahrfunktionen) kann die Fahrsimulation eine aufwandsreduzierte Alternative

zum Fahrversuch darstellen. Zwar wurde in der simulierten Umgebung kritischere Ergebnisse, d. h. mehr Fahrfehler, erzeugt, dies bedeutet allerdings auch, dass potenzielle Sicherheitsrisiken eher detektiert werden.

Zusammenfassend lieferten beide Studien empirischen Nachweis für das Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) und den darin angenommenen Zusammenhang zwischen der Überschreitung der Fahrleistungszielwerte und der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen. Wie von Voß und Schwalm (2015; s. Kapitel 2.6.3) diskutiert wurde, scheinen Fahrerinnen und Fahrer, wie auch in einer sich verändernden Fahrsituation, über die Modellpfade 1 und 3 die Aktivität und Ziele von FFT und somit die Verteilung kognitiver Ressourcen anzupassen. Darüber hinaus ist denkbar, dass die Ergebnisse der Studien einen weiteren Pfad im Arbeitsmodell unterstützen, der nicht im Fokus der Studien stand. Die besseren Fahrleistungen in der Realstudie könnten darauf hindeuten, dass Fahrerinnen und Fahrer in der realitätsnäheren Umgebung im Sinne der Unfallvermeidung besser abschneiden wollten. Möglicherweise erhöhten sie über den Pfad 2 des Modells ihre Aufwände bzw. Anstrengungen und gaben so weitere kognitive Ressourcen frei.

10.1.4. Fazit. Alle Studien der vorliegenden Dissertation zusammenfassend kann an dieser Stelle geschlussfolgert werden, dass die durchgeführten Arbeiten zur Wissensgenerierung in den ausgehend vom theoretischen Hintergrund identifizierten offenen Forschungsfeldern beitragen konnten. Somit konnte der Zielsetzung der Dissertation vollumfänglich gerecht werden. Neben einer theoretischen Modellausarbeitung in Kapitel 2.4.1.4 konnten ausgewählte Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) inhaltlich ausgeführt und deren Bedeutung im Kontext des automatisierten Fahrens untersucht werden. Die bisherige kognitive Black Box des supervisory controllers konnte im Rahmen der Möglichkeiten spezifiziert werden. Einzelne Elemente, wie die subjektive Fahrleistungsbewertung oder die Pfade der kompensativen Handlungen, wurden ausgearbeitet und mit einer zeitlichen Komponente versehen. Es zeigte sich über die Studien hinweg, dass die theoriebasierten Annahmen von Voß und Schwalm (2015) zur Verfügbarkeit funktionaler Verhaltensanpassungen im automatisierten Fahren empirisch zu unterstützen sind. Fahrerinnen und Fahrer schienen auch im automatisierten Fahren funktionale Verhaltensanpassungen im Sinne einer Handlungskaskade zur Gewährleistung einer sicheren Fahrt nutzen zu können.

Über die Pfade 1 und 3 des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) schienen sie zur Freigabe kognitiver Ressourcen die Ziele und die Aktivität einer zusätzlichen FFT in Vorbereitung auf einen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung zu reduzieren. Dabei war es unerheblich, ob die Übernahme systeminitiiert aufgrund einer sich verändernden Fahrsituation oder fahrerinitiiert aufgrund der subjektiven Fahrleistungsbewertung stattfand. Inwiefern die gewählte Forschungsmethodik der Dissertation kritisch zu reflektieren ist (s. Kapitel 10.2) und welche Implikationen durch die Ergebnisse entstehen (s. Kapitel 11), wird im Folgenden diskutiert.

10.2. Kritische Reflexion der Forschungsmethodik

Ausgehend vom vorherigen Kapitel 10.1 und der darin vorgenommenen vergleichenden Betrachtung der verschiedenen Studien der Dissertation wird nachfolgend die verwendete Forschungsmethodik kritisch reflektiert.

Erstens erscheint es wahrscheinlich, dass in den Studien 3 und 4 zur Erfassung der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung u. a. die konkrete Instruktion (nicht-automatisiertes vs. automatisiertes Fahren) einen signifikanten Einfluss auf die subjektive Fahrleistungsbewertung hatte (s. Kapitel 10.1.2). Vor dem Hintergrund der Auslegung von Fahrfunktionen sollte diese Tatsache folglich berücksichtigt werden. Je nach Anwendungsfall erscheint es essenziell, spezifische Instruktionen bzw. Studien zu nutzen. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zwischen Studien unterschiedlicher Fahrmodi erscheint aufgrund der divergierenden Ergebnisse in der Schwellenwertbestimmung eher eingeschränkt zu sein.

Zweitens können Schlussfolgerungen zur Eignung bzw. Trennschärfe der unterschiedlichen Bewertungsskalen im Rahmen der subjektiven Fahrleistungsbewertung im Kontext des automatisierten Fahrens gezogen werden. Im Rahmen der Dissertation wurden drei zentrale Items bzw. Skalen zur subjektiven Bewertung automatisierter Fahrten genutzt (Angemessenheit, Komfort-Sicherheits-Skala, Eingriffswunsch in die automatisierte Fahrzeugführung). Die Bewertung dieser Items lieferte zwischen den Studien (Online-Studie vs. Realstudie) unterschiedlich hohe Übereinstimmungen (s. Kapitel 10.1.2). Während die subjektive Fahrleistungsbewertung und die Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes für die Komfort-Sicherheits-Skala zwischen den Studien übereinstimmte, wurden für die anderen beiden Items in der Realstudie höhere Schwellenwerte nachgewiesen.

Basierend auf der Annahme, dass die Teststreckenstudie am ehesten die Realität darstellte, sollte folglich in zukünftigen aufwandseffizienteren Onlinestudien vorzugsweise die Komfort-Sicherheits-Skala genutzt werden, um eine realitätsnahe subjektive Fahrleistungsbewertung abbilden zu können.

Drittens erlaubt der Vergleich der Studien (vor allem Studie 5 und 6, s. Kapitel 10.1.3) Schlussfolgerungen über die Eignung einer statischen Fahrsimulation als Testumgebung zur Untersuchung der funktionalen Verhaltensanpassungen. Während in Studie 5 nicht optimales Verhalten oder sogar Fahrfehler im Falle von fahrerinitiierten Übernahmen der Fahrzeugführung nachgewiesen werden konnten, traf dies in Studie 6 nicht zu (lediglich ein Beinahe-Unfall). Ein nahe liegender Erklärungsansatz könnte im unterschiedlichen Fahrgefühl zwischen den beiden Testumgebungen liegen. In einer statischen Fahrsimulation fehlt Versuchspersonen die Wahrnehmung bzw. die realistische Rückmeldung der Längs- und Querverführung. Eine schlechtere Steuerbarkeit des Fahrzeugs im statischen Simulator im Vergleich zum Realverkehr könnte eine mögliche Folge hieraus sein. Eine weitere Erklärung könnte in der unterschiedlichen Abwendung der Versuchspersonen von der Fahraufgabe liegen. In der Fahrsimulation beschäftigten sich die Teilnehmenden im automatisierten Fahren stärker mit der FFT als in der Realfahrt. In der Letzteren könnte die höher wahrgenommene Kritikalität möglicher Fahrfehler zu einer weniger starken Abwendung von der Straße und somit zu einer besseren Kontrollübernahme im Falle einer Übernahme geführt haben. Mit Blick auf die Auslegung automatisierter Systeme erscheint die Fahrsimulation dennoch, wie in Kapitel 10.1.3 diskutiert, als mögliche aufwandsreduzierte Option. Das Abwenden risikoreicher Eingriffe in dieser scheinbar kritischeren Umgebung könnte als Grundlage für Maßnahmen der Unfallvermeidung im Realverkehr gesehen werden.

Viertens ist im Vergleich der Studien 5 und 6 die Operationalisierung des Gegenverkehrs zu diskutieren. Während in Studie 5 bewegter Gegenverkehr verwendet wurde, war der Gegenverkehr in Studie 6 aus Sicherheitsgründen ein stationäres Balloon-Car aus Kunststoff. Zum einen führte ein Abbremsen und Warten im Szenario Abstand $-0.15\text{ m} + \text{Baken/Pylone}$ in Studie 5 somit zum Auflösen der kritischen Situation (der Gegenverkehr passierte die Engstelle), während dies in Studie 6 nicht geschah. Hier blieb die Engstelle aufgrund der fehlenden Bewegung des Gegenverkehrs bestehen. Zum anderen könnte das Kunststoff-Material des Gegenverkehrs in Studie 6 die Wahrnehmung der Versuchspersonen beeinflusst haben (z. B. Akzeptanz höherer Late-

ralversätze in der Schwellenwertüberprüfung). Die Berücksichtigung dieses Punktes könnte in zukünftigen Studien nochmals realitätsnähere Schlussfolgerungen zur Handlungsrelevanz der Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung zulassen (s. Ausblick in Kapitel 11).

11. Implikationen und Ausblick

Mit Blick auf die Zielsetzung (Ausarbeitung ausgewählter Komponenten des Arbeitsmodells der funktionalen Verhaltensanpassungen und Untersuchung derselben im Kontext des automatisierten Fahrens) bietet die vorliegende Dissertation einen umfassenden Überblick über die fahrerseitigen regulativen Fähigkeiten zur Unfallvermeidung. Trotzdem lassen sich aus der Dissertation verschiedene Forschungsfelder ausleiten, die in Zukunft weiterer (empirischer) Betrachtung bedürfen. Sie beziehen sich auf (a) eine fortführende Analyse der in der Dissertation untersuchten Komponenten des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015), (b) eine Untersuchung weiterer Modellkomponenten, die nicht im Fokus der vorliegenden Dissertation standen sowie (c) eine spezifische Gestaltung automatisierter Systeme bzw. Systemkomponenten. Im Folgenden wird jeder dieser drei Aspekte näher ausgeführt.

11.1. Fortführende Analyse der in der Dissertation untersuchten Komponenten des Arbeitsmodells

Zur fortführenden Analyse der in der Dissertation untersuchten Modellkomponenten ist erstens die subjektive Fahrleistungsbewertung zu nennen. Studie 2 konnte ein einfaktorielles Konstrukt mit den zwei semantischen Kategorien Komfort und Sicherheit zur Beschreibung einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung herleiten (s. Kapitel 5.6). Zur Absicherung dieser Schlussfolgerung sollten in Zukunft empirische Studien, z. B. zur konfirmatorischen Faktorenanalyse, durchgeführt werden.

Weiterhin wurden ein Fragebogen zur Erfassung des Konstrukts der subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung entwickelt und eine Auswertungsmethodik hergeleitet. Wie bereits hervorgehoben wurde, bedarf diese Auswertungsmethodik weiterer Überprüfung (s. Kapitel 6.4). Dies betrifft u. a. die Identifikation eines eindeutigen Cut-off Wertes auf der Fragebogenskala, der zwischen einer subjektiv angemessenen und nicht angemessenen Fahrleistung trennscharf differenzieren kann. Zu diesem Zweck sollten Studien mit größeren Stichproben die psychodiagnostischen Gütekriterien der Validität und Reliabilität überprüfen. Beispielsweise könnte die Paralleltest-Reliabilität herangezogen werden. Über einen Vergleich mit einem inhaltlich verwandten Testverfahren könnte die Trennschärfe des Cut-offs für den in der Dissertation entwickelten Fragebogen verifiziert werden.

Zusätzlich wurden im Rahmen der aktuellen Arbeit Schwellenwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung hinsichtlich des Lateralversatzes in Abhängigkeit ausgewählter Situationsfaktoren bestimmt. Jedoch kann dies lediglich als Startpunkt in diesem Themenfeld gesehen werden. In Zukunft sollten diese Erkenntnisse ausgehend von bestehender Literatur (Bellem et al., 2017; Fischer et al., 2014) um weitere Situationsfaktoren, wie beispielsweise die Streckenführung (Gerade vs. Kurve), die Tageszeit (Tag vs. Nacht), den Straßentyp (Landstraße vs. Autobahn) sowie die Bebauung der Strecke erweitert werden. Ein mögliches Ziel könnte die Ausarbeitung einer detaillierten Matrix sein, in der für die unterschiedlichen Faktorenkombinationen spezifische Schwellenwerte festgehalten und anschließend für die Auslegung automatisierter Systeme genutzt werden.

Neben dieser fortführenden Untersuchung der subjektiven Fahrleistungsbewertung, lassen sich auch für deren Zusammenhang mit der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen weitere empirische Schritte ableiten. Im Hinblick auf die Realstudie (Studie 6) waren die geringe Stichprobengröße und die Verwendung eines stationären Balloon-Cars zentrale Punkte der kritischen methodischen Reflexion (s. Kapitel 9.4 und Kapitel 10.2). Da die Studie vor allem der Überprüfung der Praxisrelevanz dienen sollte, erscheint es zur Steigerung der Aussagekraft sinnvoll, die durchgeführte Studie unter Berücksichtigung dieser beiden Punkte zu replizieren. Neben einer größeren Stichprobe sollte unter Gewährleistung der Versuchspersonensicherheit ein bewegtes Balloon-Car verwendet werden. Die in einer solchen Studie erhobenen Daten wären im Anschluss für die Generierung eines simulierten Fahrermodells nutzbar. In diesem könnten die Daten extrapoliert werden, um so die Wahrscheinlichkeiten zu untersuchen, mit denen nicht optimales Verhalten oder (Beinahe-) Unfälle in größeren Populationen bei Eingriffen in die automatisierte Fahrzeugführung zu erwarten sind.

11.2. Untersuchung weiterer Komponenten des Arbeitsmodells

Ein zweites Forschungsfeld, welches Thema zukünftiger Arbeiten sein sollte, ist die Untersuchung weiterer Modellkomponenten, die nicht im Fokus der vorliegenden Dissertation standen. So war Pfad 2 der kompensativen Handlungen, die Anpassungen in den Nutzerfaktoren, nicht explizit Teil der empirischen Studien. Zur vollständigen Modellvalidierung sollte jedoch auch dieser Punkt betrachtet werden. Das Arbeitsmodell postuliert in Anlehnung an Hockey (1997), dass grundsätzlich Anpassungen der

Nutzerfaktoren (z. B. eine Erhöhung der Anstrengungen) als aversiv erfahren und somit eher vermieden werden. Sie werden somit nur dann in Betracht gezogen, wenn die anderen beiden Optionen (Pfad 1 und 3) nicht möglich bzw. mit negativen Konsequenzen verbunden wären. Die Unterbrechung der Programmierung eines Navigationsgeräts könnte aufgrund des systemeigenen Timeouts (d. h., die Programmierung wird nach einer bestimmten Zeit ohne Eingabe abgebrochen) beispielsweise zu einer solchen negativen Konsequenz führen. Im Sinne des Arbeitsmodells wäre somit eher eine kurzfristige Erhöhung der Anstrengungen zu erwarten, unter der sowohl die Fahraufgabe als auch die FFT gleichzeitig bearbeitet werden könnten. Auch die Diskussion im Rahmen der Studie 6 zu den im Realversuch erhöhten Anstrengungen (s. Kapitel 10.1.3) könnte ein Beispiel zur Abwendung negativer Konsequenzen (Fahrfehler) darstellen. Zukünftige Studien sollten sich dieser Idee annehmen. Ziel aus der wissenschaftlichen Perspektive sollte es sein, diese erhöhten Anstrengungen, d. h. im Sinne des Arbeitsmodells die von Fahrerinnen und Fahrern in Kauf genommene Beanspruchung, objektiv messbar zu machen. Nur so ließen sich Pfad 2 Anpassungen reliabel und valide nachweisen. In der Anwendung sollte das Ziel die Entwicklung von unterstützenden Systemen sein, die z. B. Teile der Fahraufgabe übernehmen, während Fahrerinnen und Fahrer die Bearbeitung einer FFT abschließen, sodass der aversiv erfahrene Pfad 2 nicht genutzt werden muss.

11.3. Gestaltung automatisierter Systeme bzw. Systemkomponenten

Ein drittes relevantes Forschungsfeld für zukünftige Arbeiten ist die spezifische Gestaltung automatisierter Systeme bzw. Systemkomponenten. Die Einbettung der funktionalen Verhaltensanpassungen gemäß Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) ins automatisierte Fahren wurde bereits in den Diskussionskapiteln der einzelnen empirischen Studien zur Ableitung erster Handlungsempfehlungen für automatisierte Fahrfunktionen genutzt (s. Kapitel 4.4, 5.6, 6.4, 7.4, 8.3.3 und 9.4). Diese Handlungsempfehlungen bezogen sich zum einen auf die nutzeroptimierte Auslegung von Fahrfunktionen. So könnten Fahrkomfort und Fahrspaß erhöht und gleichzeitig potenziell sicherheitskritische Eingriffe durch Fahrerinnen und Fahrer aufgrund von mangelndem Komfort oder Systemvertrauen verhindert werden. Zum anderen wurden Überlegungen zur Gestaltung dennoch auftretender, möglicher Übernahmen angestellt, sodass diese

sicher ablaufen können. Im Folgenden werden diese beiden Kategorien aufgegriffen und erweitert.

11.3.1. HMI-Gestaltung und adaptive Trajektorienmechanismen. Wie die Dissertation zeigen konnte, scheint es situationsspezifische Schwellenwerte in der Fahrleistung zu geben (s. Kapitel 10.1.2), deren Überschreiten einen relevanten Faktor bei der Auslösung funktionaler Verhaltensanpassungen im Kontext des automatisierten Fahrens darstellt (s. Kapitel 10.1.3). Gemäß der Fahrsimulationsstudie (Studie 5, s. Kapitel 8) zeigte sich dabei neben der Komfortrelevanz (negative Bewertung der automatisierten Fahrt und Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung) auch eine Sicherheitsrelevanz (nicht optimale bzw. sicherheitskritische Eingriffe). In der Realstudie (Studie 6, s. Kapitel 9) konnte zwar die Komfortrelevanz bestätigt werden, die Sicherheitsrelevanz zeigte sich jedoch nur bedingt (nur ein Beinahe-Unfall). Ausgehend von der Annahme, dass aber bereits die Komfortrelevanz einen entscheidenden Aspekt für den Erfolg eines automatisierten Systems darstellt, erscheint es schlüssig, die subjektive Fahrleistungsbewertung bei der nutzeroptimierten Auslegung automatisierter Fahrfunktionen zu berücksichtigen. Im Sinne adaptiver Trajektorienmechanismen sollte die automatisierte Trajektorie an die subjektiven Fahrleistungspräferenzen in einer bestimmten Fahrsituation angepasst werden (d. h., die automatisierte Trajektorie verbleibt unter Berücksichtigung der Fahrsituationen unter dem Schwellenwert einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung). Hierzu könnte in Zukunft auch auf die zu erarbeitende Situationsmatrix zurückgegriffen werden (s. Kapitel 11.1). Gemäß den Dissertationsergebnissen sollten die Anpassungen in der Trajektorie nach Möglichkeit an das präferierte Fahrerverhalten (Lenken vs. Bremsen) angepasst und proaktiv, d. h. vor dem Überschreiten der subjektiven Fahrleistungsschwelle, vorgenommen werden. Eine FFT-Reduktion wäre in solchen Fällen ein Indiz für das automatisierte System, dass mit dem Überschreiten der Fahrleistungsschwelle und folglich einem fahrerseitigen Eingriff in die automatisierte Fahrzeugführung zu rechnen sei.

Ein zweiter Punkt der nutzeroptimierten Auslegung von Fahrfunktionen betrifft ein Element der HMI-Gestaltung. Wie die Studien 5 und 6 zeigen konnten, scheinen Fahrerinnen und Fahrer auch in Situationen ohne objektives Unfallrisiko aufgrund von mangelndem Systemvertrauen bzw. mangelndem Komfort in die automatisierte Fahrzeugführung einzugreifen. Eine alternative Möglichkeit zur Vermeidung solcher even-

tuell nicht optimaler oder sicherheitskritischer Eingriffe wäre die Entwicklung einer HMI-Anzeige, welche Fahrerinnen und Fahrer über die Möglichkeiten des Systems zur unfallfreien Lösung einer Fahrsituation informieren könnte. Als solches könnte gemäß dem Arbeitsmodell von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) ein fahrerseitiges Situationsverständnis geschaffen und kompensative Handlungen aufgrund einer möglichen Diskrepanz zwischen Ist- und Zielwerten in der Fahrleistung vermieden werden.

11.3.2. Gestaltung von Übernahmen. Die zuvor vorgestellten Gestaltungsempfehlungen haben zum Ziel, Fahrkomfort zu gewährleisten und Eingriffe in die automatisierte Fahrzeugführung zu vermeiden. Falls es dennoch zu Übernahmen kommt (entweder fahrerinitiiert oder bis zu SAE Level 3 systeminitiiert an Systemgrenzen), sollten diese sicher ablaufen.

In diesem Kontext werden in Literatur bei systeminitiierten Übernahmen oftmals benötigte Übernahmezeiten diskutiert (s. Kapitel 2.6.3.4). Allerdings besteht bei dieser Definition fester TOR-Zeiten die Gefahr, dass die Systemauslegung unabhängig von der spezifischen Fahrsituation und vor allem vom gezeigten Nutzerverhalten ausfällt. Die Erkenntnis der Dissertation, dass im automatisierten Fahren die proaktive FFT-Reduktion auf das Niveau einer nicht-automatisierten Fahrt als Indikator für die Übernahmefähigkeit herangezogen werden kann, erlaubt eine alternative, adaptive Herangehensweise. In dieser müsste das automatisierte System die Bearbeitung der FFT bzw. deren Reduktion dauerhaft überwachen. Eine schnelle Reduktion würde im Sinne des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) auf eine kurzfristige, vollumfängliche Aktivierung der funktionalen Verhaltensanpassungen hindeuten, so dass eine kurze Übergabezeit ausreichend erscheint. Bei langsameren FFT-Reduktionen sollte komplementär die Übernahmezeit verlängert werden. Ein unzureichender oder ausbleibender Angleich sollte dem System im letzten Schritt einer Kaskade als Indikator für den Abbruch einer Übergabe und zur Einleitung eines risikominimalen Manövers (s. z. B. Gasser et al., 2012) dienen.

Eine parallele Überlegung lässt sich für fahrerinitiierte Übernahmen anstellen. Derzeitig ist gesetzlich geregelt, dass Fahrerinnen und Fahrer jederzeit die Möglichkeit haben, in die Fahrzeugführung einzugreifen (SAE International, 2018). Ausgehend von dem in der Dissertation nachgewiesenen Sicherheitsrisiko solcher Übernahmen in Situationen, in denen bei aktiver Automation kein objektives Unfallrisiko besteht, könnte an

dieser Stelle eine neue, ganz eigene Gefahrenquelle entstehen. Deshalb ist zu diskutieren, ob Fahrerinnen und Fahrer in entsprechenden Situationen bei einer ausbleibenden FFT-Reduktion unterstützt bzw. geschützt werden müssten (z. B. durch die Abmilderung oder Dämpfung der Eingriffsmöglichkeiten im Lenkrad).

Obwohl diese und in Kapitel 11.3.1 gemachten Vorschläge zur Überwachung der FFT-Aktivität basierend auf den empirischen Ergebnissen und den Annahmen des Arbeitsmodells von Schwalm et al. (2015; Voß & Schwalm, 2015) schlüssig erscheinen, ist deren Umsetzbarkeit zu reflektieren. Insgesamt erscheint die FFT-Bearbeitung ein schwieriges Maß für die hoch komfort- und sicherheitsrelevanten Entscheidungen hinsichtlich risikominimaler Manöver, abgemilderter Eingriffsmöglichkeiten oder der Auslösung adaptiver Trajektorienmechanismen zu sein. Die in den Studien verwendete FFT (SuRT) stellt eine eher abstrakte Aufgabe dar, die in einer solchen Form selten im Realverkehr auftreten wird. Andere, realistischere FFT (z. B. das Schauen eines Filmes oder ein Gespräch mit Mitfahrenden) sind im Zweifel nicht so gut quantifizierbar bzw. besitzen keine direkt messbare Baseline wie in Studie 1 (Aktivität während einer nicht-automatisierten Fahrt). Auch erscheint es möglich, dass Fahrerinnen und Fahrer gar keine FFT bearbeiten und trotzdem nicht im Loop der Fahraufgabe sind (z. B. Tagträumen oder Schlafen). Als solches ist zu überlegen, inwiefern die Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation eher als Basis für andere Herangehensweisen zu verstehen sind. Ausgehend von den FFT-Daten könnte untersucht werden, ob es im Falle einer proaktiven FFT-Reduktion andere Verhaltensindikatoren (z. B. Physiologie oder Blickmuster) gibt, die mit dieser FFT-Aktivität korrelieren und als besser überwachbares Maß herangezogen werden sollten.

Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. & Bruder, R. (2012). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 4-14). Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- ADAC (n.d.a). *Unfallgeschehen im Überblick. Tödlich Verunglückte*. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_2_3_toedlich_verunglueckte_42794.pdf
- ADAC (n.d.b). *Unfallrisiko*. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_7_1_unfallrisiko_42782.pdf
- Arthur, W. & Graziano, W. G. (1996). The five-factor model, conscientiousness, and driving accident involvement. *Journal of Personality*, 64(3), 593-618.
- Ascone, D., Lindsey, T. & Varghese, C. (2009). An examination of driver distraction as recorded in NHTSA databases. *Traffic Safety Facts - Research Note No. HS-811 216*.
- Ashley, W. S., Strader, S., Dziubla, D. C. & Haberlie, A. (2015). Driving blind: weather-related vision hazards and fatal motor vehicle crashes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(5), 755-778.
- Bärgman, J., Smith, K. & Werneke, J. (2015). Quantifying drivers' comfort-zone and dread-zone boundaries in left turn across path/opposite direction (LTAP/OD) scenarios. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 35, 170-184.
- Beede, K. E. & Kass, S. J. (2006). Engrossed in conversation: The impact of cell phones on simulated driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 415-421.
- Bellem, H., Kluver, M., Schrauf, M., Schoner, H-P., Hecht, H. & Krems, J. F. (2017). Can we study autonomous driving comfort in moving-base driving simulators? A validation study. *Human Factors*, 59(3), 442– 456.
- Björnstig, U., Björnstig, J. & Eriksson, A. (2008). Passenger car collision fatalities—with special emphasis on collisions with heavy vehicles. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 158-166.
- Blana, E. & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 44(2), 303-313.

- Bourne, L. E. & Ekstrand, B. R. (2001). *Einführung in die Psychologie (Titel der Originalausgabe: Ist Principles and Meanings)* (3. Auflage). Eschborn bei Frankfurt am Main: Dietmar Klotz.
- Breuer, J. (2000). Beurteilung des Fahrverhaltens im Fahrsimulator der DaimlerChrysler AG und in realen Fahrzeugen. In K. Becker et al. (Hrsg.), *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen: Korrelation zwischen CAE-Berechnung, Versuch und Messung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten* (S. 43-53). Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.
- Buld, S., Tietze, H. & Krüger, H. P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 161-187). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Burns, P. C., Trbovich, P. L., McCurdie, T. & Harbluk, J. L. (2005). Measuring distraction: task duration and the lane-change test (LCT). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting, 1980-1983*.
- Carsten, O., Lai, F. C., Barnard, Y., Jamson, A. H. & Merat, N. (2012). Control task substitution in semiautomated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human Factors, 54*(5), 747-761.
- Crawford, A. (1963). The overtaking driver. *Ergonomics, 6*(2), 153-170.
- Crundall, D., Underwood, G. & Chapman, P. (1999). Driving experience and the functional field of view. *Perception, 28*(9), 1075-1087.
- Damböck, D., Bengler, K., Farid, M. & Tönert, L. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. In *Proceedings of the 5. Tagung Fahrerassistenz. Schwerpunkt Vernetzung*. München: TÜV SÜD Akademie GmbH.
- Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M. & Bengler, K. (2013). Requirements for cooperative vehicle guidance. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (S. 1656-1661).
- de Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload* (Dissertation). Haren, The Netherlands: The Traffic Research Center, University of Groningen.
- Deutsches Institut für Normung (2014). *DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch-Teil 351: Leittechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dick, M. (2001). *Die Situationen des Fahrens. Phänomenologische und ökologische Perspektiven der Psychologie* (Dissertation). Technische Universität Hamburg-

- Harburg. Hamburger Beiträge zur Psychologie und Soziologie der Arbeit, Sonderband 3.
- Dick, M. (2002). Auf den Spuren der Motive, Auto zu fahren – Die Perspektive der Fahrenden. *Verkehrszeichen* 4(18), 9-16.
- Dijksterhuis, C., Brookhuis, K. A. & de Waard, D. (2011). Effects of steering demand on lane keeping behaviour, self-reports, and physiology. A simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 1074-1081.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J. & Knipling, R. R. (2006). *The 100-car naturalistic driving study: Phase II – results of the 100-car field experiment*. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration.
- Dozza, M., Schindler, R., Bianchi-Piccinini, G. & Karlsson, J. (2016). How do drivers overtake cyclists? *Accident Analysis & Prevention*, 88, 29-36.
- Eberl, T. X. (2014). *Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen* (Dissertation). München: Technische Universität München.
- Eckstein, L. (2014). *Aktive Fahrzeugsicherheit und Fahrerassistenz. Umdruck zur Vorlesung Fahrzeugtechnik III - Systeme und Sicherheit*. Aachen: fka Forschungsgesellschaft für Kraftfahrwesen mbH Aachen.
- Endsley, M. R. (1988) Situation Awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)* (S. 789-795). New York: IEEE.
- Endsley, M. R. (1995a). Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 65-84.
- Endsley, M. R. (1995b). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M. R. (2015). Situation awareness misconceptions and misunderstandings. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 9(1), 4-32.
- Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*, 37(2), 381-394.
- Engelbrecht, A, Engeln, A. & Arndt, S. (2009). Wie entstehen Komfort und Fahrspaß - Beschreibung und Bewertung von Fahrkomfort und Fahrspaß aus Expertensicht.

- Der Fahrer im 21. Jahrhundert In 5. VDI-Tagung: *Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. Düsseldorf.
- Engström, J. (2011). *Understanding attention selection in driving: From limited capacity to adaptive behaviour* (Dissertation). Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Engström, J. A., Victor, T. & Markkula, G. (2013). Attention selection and multitasking in everyday driving: A conceptual model. In M. A. Regan, J. D. Lee & T. Victor (Hrsg.) *Driver Distraction and inattention, advances in research and countermeasures* (1, S. 27-54). Surrey, England: Ashgate.
- Engström, J., Johansson, E. & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- Finley, C. & Finley, R. (2015). Survey Monkey®. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter <https://de.surveymonkey.com>
- Fischer, R., Küpper, K. & Schögl, P. (2014). Antrieboptimierung durch Fahrzeugvernetzung. In *35th International Vienna Motor Symposium*.
- Fitch, G. M., Hanowski, R. J. & Guo, F. (2015). The risk of a safety-critical event associated with mobile device use in specific driving contexts. *Traffic injury prevention*, 16(2), 124-132.
- Fitch, G., Toole, L., Grove, K., Soccolich, S. & Hanowski, R. J. (2017). *Investigating Drivers' Compensatory Behavior when Using a Mobile Device*. Blacksburg: Virginia Tech Transportation Institute.
- Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche – Transports – Sécurité*, 66, 47-57.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident, Analysis and Prevention*, 37(3), 461-472.
- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J. & Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, 83.
- Genuit, K. & Sottek, R. (2010). Das menschliche Gehör und Grundlagen der Psychoakustik. In K. Genuit (Hrsg.), *Sound-Engineering im Automobilbereich* (S. 39-88). Berlin Heidelberg: Springer.

- Gibson, J. J. & Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, 51(3), 453-471.
- Godthelp, H. (1988). The limits of path error-neglecting in straight lane driving. *Ergonomics*, 31(4), 609-619.
- Gold, C. (2014). Automatisiertes Fahren-ohne Mensch wird alles besser? *Ergonomie*, 15, 7-9.
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L. & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 1938-194.
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Kochhar, D., ... & Grant, P. (2003). Driver distraction: Evaluation with event detection paradigm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1843, 1-9.
- Grzesik, A. (2009). *Physiologiebasierte Simulation des Bremsverhaltens von Fahrzeugführern* (Dissertation). Ilmenau: Technical University of Ilmenau.
- Griffiths, P. G. & Gillespie, R. B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors*, 47(3), 574-590.
- Haider, E. (1977). *Beurteilung von Belastung und zeitvarianter Beanspruchung des Menschen bei kompensatorischen Regeltätigkeiten: Simulationen-Feldstudien-Modelle*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Haigney, D. E., Taylor, R. G. & Westerman, S. J. (2000). Concurrent mobile (cellular) phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 3(3), 113-121.
- Hancock, P. A. & Sawyer, B. D. (2015). Judging Thieves of Attention. Commentary on 'Assessing Cognitive Distraction in the Automobile' by Strayer, Turrill, Cooper, Coleman, Medeiros-Ward, and Biondi (2015). *Human Factors*, 57(8), 1339-1342.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., Trbovich, P. L. & Eizenman, M. (2007). An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 372-379.

- Harbluk, J. L., Burns, P. C., Lochner, M. & Trbovich, P. L. (2007). Using the lane change test (LCT) to assess distraction: Tests of visual-manual and speech-based operation of navigation system interfaces. *Proceedings of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Stevenson, Washington*, 16-22.
- Harbluk, J. L., Mitroi, J. S. & Burns, P. C. (2009). Three navigation systems with three tasks: Using the lane-change test (LCT) to assess distraction demand. *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Big Sky, MT*, 24-30.
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 50(9), 904-908.
- Hautière, N., Dumont, E., Brémond, R. & Ledoux, V. (2009). Review of the mechanisms of visibility reduction by rain and wet road. In *8th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag.
- Heckler, B. (2016). *Funktionales Situationsmanagement im Kontext des automatisierten Fahrens*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Aachen: RWTH Aachen University.
- Heino, A. (1996). *Risk taking in car driving; perceptions, individual differences and effects of safety incentives* (Dissertation). Haren: Traffic Research Center, University of Groningen.
- Herzberger, N. D. (2015). *Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zur subjektiven Bewertung von Fahrerleistungen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Aachen: RWTH Aachen University.
- Herzberger, N. D., Eckstein, L. & Schwalm, M. (2018). Detection of missing takeover capability by the orientation reaction to a takeover request. In Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR (Hrsg.), 27. *Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* (S. 1231-1240).
- Herzberger, N. D., Schwalm, M., Reske, M., Woopen, T. & Eckstein, L. (2019). Mobilitätskonzepte der Zukunft – Ergebnisse einer Befragung von 619 Personen in Deutschland im Rahmen des Projekts UNICARagil. Abgerufen am 16.01.2019. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/330359861_Mobilitaetskonzepte_der_Zukunft_-_Ergebnisse_einer_Befragung_von_619_Personen_in_Deutschland_im_Rahmen_des_Projekts_UNICARagil

- Hilburn, B. & Jorna, P. G. A. M. (2001). Workload and air traffic control. In P. A. Hancock & P. A. Desmond (Hrsg.), *Human factors in transportation. Stress, workload, and fatigue* (S. 384-394). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1-3), 73-93.
- Horrey, W. J., Lesch, M. F., Mitsopoulos-Rubens, E & Lee, J. D. (2015). Calibration of skill and judgment in driving: Development of a conceptual framework and the implications for road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 76, 25–33.
- Horrey, W. J. & Wickens, C. D. (2002). Driving and side task performance: the effects of display cluster, separation and modality. *Aviation Human Factors Technical Report, ARL-02-13/GM-02-2*. Savoy, IL: University of Illinois.
- Horvath, P & Zuckerman, M. (1993). Sensation seeking, risk appraisal, and risky behavior. *Personality and Individual Differences*, 14(1), 41-52.
- Hosking, S. G., Young, K. L. & Regan, M. A. (2009). The effects of text messaging on young drivers. *Human Factors*, 51(4), 582-592.
- Huemer, A. K. & Vollrath, M. (2012). Ablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten-Machbarkeitsstudie. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit, M225*.
- Huth, V., Sanchez, Y. & Brusque, C. (2015). Drivers' phone use at red traffic lights: A roadside observation study comparing calls and visual–manual interactions. *Accident Analysis & Prevention*, 74, 42-48.
- Hütter, A. (2013). Verkehr auf einen Blick. In Statistisches Bundesamt (Hrsg.), *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Iversen, H. & Rundmo, T. (2002). Personality, risky driving and accident involvement among Norwegian drivers. *Personality and Individual Differences*, 33(8), 1251-1263.
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M. & Lai, F. C. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation research part C: emerging technologies*, 30, 116-125.
- Jonah, B. A. (1997). Sensation seeking and risky driving: a review and synthesis of literature. *Accident Analysis & Prevention*, 29(5), 651-665.

- Jonah, B. A., Thiessen, R. & Au-Yeung, E. (2001). Sensation seeking, risky driving and behavioral adaptation. *Accident Analysis & Prevention*, 33(5), 679-684.
- Josten, J., Zlocki, A. & Eckstein, L. (2016). Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren. *FAT Schriftenreihe*, 289.
- Kaber, D. B. & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131.
- Kahneman (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Kayser, H. J. & Heß, M. (1990). Die Abhängigkeit des Blickverhaltens des Kraftfahrers von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung. In H. Derkum (Hrsg.), *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr. Beiträge zur interdisziplinären Diskussion* (S.103-108). Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH.
- Kayser, H. J., Sanders, A. F., Heß, M., Spijkers W. A. C. & Bartmann, A. (1989). Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, 557.
- Keck, C. M. (2016). *Bestimmung unterer Grenzwerte einer subjektiv angemessen empfundenen Fahrleistung & Untersuchung des Einflusses ausgewählter Personen- und Situationsfaktoren*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Aachen: RWTH Aachen University.
- Klapp, S. T., Maslovat, D. & Jagacinski, R. J. (2018). The bottleneck of the psychological refractory period effect involves timing of response initiation rather than response selection. *Psychonomic bulletin & review*, 1-19.
- Konstantopoulos, P., Chapman, P. & Crundall, D. (2010). Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. Using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 827-834.
- Kontaratos, A. N. (1974). A systems analysis of the problem of road casualties in the United States. *Accident Analysis & Prevention*, 6(3), 223-241.
- Krüger, H. P., Neukum, A. & Schuller, J. (1999). Bewertung von Fahrzeugeigenschaften–Vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl. In *VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 22*.

Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen—3. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag.

- Kühn, M. & Hannawald, L. (2015). Verkehrssicherheit und Potentiale von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 55-70). Wiesbaden: Springer.
- Kuiken, M. & Twisk, D. (2001). *Safe driving and the training of calibration.* Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research.
- Lajunen, T. & Summala, H. (1995). Driving experience, personality, and skill and safety-motive dimensions in drivers' self-assessments. *Personality and Individual Differences, 19*, 307-318.
- Lansdown, T. C., Brook-Carter, N. & Kersloot, T. (2004). Distraction from multiple in-vehicle secondary tasks: vehicle performance and mental workload implications. *Ergonomics, 47*(1), 91-104.
- Lee, J. D. & Boyle, L. N. (2015). Is talking to your car dangerous? It depends: prologue to the special section. *Human factors, 57*(8), 1297-1299.
- Lenz, K. & Burger, W. (1975). Spurverhalten von Kraftfahrzeugen auf einer zweispurigen Landstraße. *Straßen und Autobahn, 26*(11).
- Lerner, N. & Boyd, S. (2005). *Task Report On-Road Study of Willingness to Engage in Distracting Tasks.* Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration
- Levy, J. & Pashler, H. (2008). Task prioritisation in multitasking during driving: Opportunity to abort a concurrent task does not insulate braking responses from dual-task slowing. *Applied Cognitive Psychology, 22*(4), 507-525.
- Lewis-Evans, B., de Waard, D. & Brookhuis, K. A. (2010). That's close enough - A threshold effect of time headway on the experience of risk, task difficulty, effort, and comfort. *Accident Analysis & Prevention, 42*(6), 1926-1933.
- Liang, Y., Horrey, W. J. & Hoffman, J. D. (2015). Reading text while driving: Understanding drivers' strategic and tactical adaptation to distraction. *Human Factors, 57*(2), 347-359.
- Liu, B.-S. & Lee, Y.-H. (2006). In-vehicle workload assessment, Effects of traffic situations and cellular telephone use. *Journal of Safety Research, 37*, 99-105.
- Llaneras, R. E., Salinger, J. A. & Green, C. A. (2013). Human factors issues associated with limited ability autonomous driving systems: Drivers' allocation of visual

- attention to the forward roadway. *Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 92-98.
- Mattes, S. & Hallén, A. (2009). Surrogate distraction measurement techniques: The lane change test. In M. A. Regan, J. D. Lee & K. L. Young (Hrsg.), *Driver Distraction: Theory, Effects, and Mitigation* (S. 107-121). Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- McKnight, A. J. & McKnight, A. S. (1993). The effect of cellular phone use upon driver attention. *Accident Analysis & Prevention*, 25(3), 259-265.
- Merat, N. & Jamson, A. H. (2009). How do drivers behave in a highly automated car. *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 514-521.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors*, 54(5), 762-771.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C., Daly, M. & Carsten, O. M. (2014). Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 274-282.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human behavior and traffic safety* (S. 485-524). Boston, MA: Springer.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
- Mueller, A. S. & Trick, L. M. (2012). Driving in fog: The effects of driving experience and visibility on speed compensation and hazard avoidance. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 472-479.
- Muigg, A. (2009). *Implizites Workloadmanagement: Konzept einer zeitlich-situativen Informationsfilterung im Automobil* (Dissertation). München: TU München.
- Näätänen, R. & Summala, H. (1974). A model for the role of motivational factors in drivers' decision making. *Accident Analysis and Prevention*, 6, 243-261.
- Naujoks, F., Mai, C. & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions *Advances in Human Aspects of Transportation: Part I*, 7, 431.

- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H. P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In 5. *Workshop Fahrerassistenzsysteme-FAS* (S. 141-150). Karlsruhe: Fmrt.
- NHTSA. (2013). *U.S. Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development*. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf
- Nietzschmann, C., Klaudt, S., Klas, C., Will, D. & Eckstein, L. (2018). Trajectory optimization for car-like vehicles in structured and semi-structured environments. *Proceedings of 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 504-51.
- Oltedal, S. & Rundmo, T. (2006). The effects of personality and gender on risky driving behaviour and accident involvement. *Safety Science*, 44(7), 621-628.
- Östlund, J., Nilsson, L., Carsten, O., Merat, N., Jamson, H., Jamson, S., ... & Sandberg, H. (2004). *HMI and safety-related driver performance*. Haste deliverable.
- Owens, J. M., McLaughlin, S. B. & Sudweeks, J. (2011). Driver performance while text messaging using handheld and in-vehicle systems. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 939-947.
- Papakostopoulos, V., Marmaras, N. & Nathanael, D. (2017). The “field of safe travel” revisited: interpreting driving behaviour performance through a holistic approach. *Transport Reviews*, 37(6), 695-714.
- Parkes, A. & Hooijmeijer, V. (2000). *The influence of the use of mobile phones on driver situation awareness*. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter <https://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/Human%20Factors/driver-distraction/PDF/2.PDF>
- Parkin, J. & Meyers, C. (2010). The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic. *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), 159-165.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220.
- Peng, Y., Boyle, L. N. & Hallmark, S. L. (2013). Driver's lane keeping ability with eyes off road: Insights from a naturalistic study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 628-634.
- Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T. & Mergl, C. (2013). Wie lange braucht der Fahrer-eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkei-

ten während einer hochautomatisierten Staufahrt. *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren.*

- Petzoldt, T., Bär, N. & Krems, J. F. (2009). Gender effects on lane change test (LCT) performance. *Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Big Sky, MT*, 90-96.
- Petzoldt, T., Bär, N., Ihle, C. & Krems, J. F. (2011). Learning effects in the lane change task (LCT) – Evidence from two experimental studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 14, 1-12.
- Piechulla, W., Mayser, C., Gehrke, H. & König, W. (2003). Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man-machine interface. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 6(4), 233-248.
- Platten, F. (2012). *Analysis of Mental Workload and Operating Behavior in Secondary Tasks while Driving* (Dissertation). Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.
- Platten, F., Milicic, N., Schwalm, M. & Krems, J. F. (2013). Using an Infotainment system while driving – A continuous analysis of behavior adaptations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 21, 103-112.
- Platten, F., Schwalm, M. & Krems, J. F. (2011). The effect of anticipation on mental workload while driving. In D. de Waard, N. Gerard, L. Onnasch, R. Wiczorek & D. Manzey (Hrsg.), *Human Centered Automotion* (S. 329-337). Maastricht: Workload on Operating Behavior Shaker.
- Platten, F., Schwalm, M., Hülsmann, J. & Krems, J. F. (2014). Analysis of compensative behavior in demanding driving situations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 26, 38-48.
- Popiv, D. (2012). *Enhancement of Driver Anticipation and Its Implications on Efficiency and Safety* (Dissertation). München: TU München.
- Radlmayr, J. & Bengler, K. (2015). Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren. *FAT-Schriftenreihe*, 276, 1-57.
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M. & Bengler, K. (2014). How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 2063-2067.

- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext* (Dissertation). Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Rauch, N., Gradenegger, B. & Krüger, H.-P. (2009) Darf ich oder darf ich nicht? Situationsbewusstsein im Umgang mit Nebenaufgaben während der Fahrt. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 63(1), 3-17.
- Recarte, M. A. & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(2), 119.
- Richter, H., Ecker, R., Deisler, C. & Butz, A. (2010). HapTouch and the 2+1 State Model: Potentials of Haptic Feedback on Touch Based In-Vehicle Information Systems. *Proceedings of the Second International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*, 72-79.
- Riedel, A. (2000). Subjektive und objektive Beurteilung des Handlings von Pkw. In K. Becker (Hrsg.), *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen* (S. 27-53). Renningen-Malsheim: Expert Verlag.
- Rohrbeck, M. & Swierc, D. (2015). *Entwicklung eines computerbasierten Fahrsimulator-Werkzeuges zur Ermittlung einer Komfortzone von Fahrern im Straßenverkehr*. Unveröffentlichte Projektarbeit. Aachen: RWTH Aachen University.
- Rognin, L., Alidra, S., Val, C., Lescaut, A. & Chalandon, X. (2007). Driver strategies when interacting with information and comfort systems. *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Lyon*.
- Rosey, F., Auberlet, J. M., Moisan, O. & Dupré, G. (2009). Impact of narrower lane width: Comparison between fixed-base simulator and real data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2138, 112-119.
- Rösler, F. (2009). Subjektive und objektive Charakteristika von Bedienelementen, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, 111(4), 292-297.
- Rudack, M., Meincke, M., Jobmann, K. & Lott, M. (2003). On traffic dynamical aspects of inter vehicle communications (IVC). In *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall* (S.3368-3372). IEEE.

- SAE International (2018). *SAE J 3016 (R) Taxonomy and Definitions for Terms related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*
- von Salm-Hoogstraeten, S. R. A. M. (2015). *Entwicklung eines initialen Fragebogens zur subjektiven Fahrleistungsbewertung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Aachen: RWTH Aachen University.
- Schießl, C. (2008). Subjective strain estimation depending on driving manoeuvres and traffic situation. *Intelligent Transport Systems*, 2(4), 258-265.
- Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Petermann-Stock, I. & Othersen, I. (2015). The interaction between highly automated driving and the development of drowsiness. *Procedia Manufacturing*, 3, 6652-6659.
- Schömig, N., Schoch, S., Neukum, A., Schumacher, M. & Wandtner, B. (2015). Simulatorstudien zur Ablenkungswirkung fahrfremder Tätigkeiten. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit*, M253.
- Schwalm, M. (2009). *Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext* (Dissertation). Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- Schwalm, M., Keinath, A. & Zimmer, H. D. (2008). Pupillometry as a method for measuring mental workload within a simulated driving task. In D. de Waard, F. Flemisch, B. Lorenz, H. Oberheid & K. Brookhuis (Hrsg.), *Human Factors for assistance and automation* (S. 75-88). Maastricht: Shaker.
- Schwalm, M., Voß, G. M. I. & Ladwig, S. (2015). Inverting traditional views on human task-processing behavior by focusing on abilities instead of disabilities—A discussion on the functional situation management of drivers to solve demanding situations. In D. Harris (Hrsg.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (S. 286-296). Cham: Springer.
- Serafin, C. (1994). *Driver eye fixation on rural roads: insights into safe driving behavior*. Michigan: The University of Michigan, Transport research Institute (UMTRI)
- Shen, S. & Neyens, D. M. (2014). Assessing drivers' performance when automated driver support systems fail with different levels of automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58(1), 2068-2072.
- Shinar, D. (2015). Cognitive workload ≠ crash risk: Rejoinder to study by Strayer et al. (2015). *Human factors*, 57(8), 1328-1330.

- Siebenpfeiffer, W. (2014). *Vernetztes Automobil. Sicherheit - Car IT - Konzepte*. Stuttgart: Springer Vieweg.
- Siebert, F. W., Oehl, M. & Pfister, H. R. (2014). The influence of time headway on subjective driver states in adaptive cruise control. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 25, 65-73.
- Siebert, F. W., Oehl, M., Bersch, F. & Pfister, H. R. (2017). The exact determination of subjective risk and comfort thresholds in car following. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 46, 1-13.
- Spencer, D. & Garrett, J. J. (2009). *Card sorting. Designing usable categories*. Brooklyn, N.Y.: Rosenfeld Media.
- Stanton, N. A., Young, M. & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. *Safety Science*, 27(2), 149-159.
- Statistisches Bundesamt (2016). *Verkehr. Verkehrsunfälle 2014. Fachserie 8, Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. M. & Nilsson, L. (2014). Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 218-228.
- Strayer, D. L. & Cooper, J. M. (2015). Driven to distraction. *Human Factors*, 57(8), 1343-1347.
- Strayer, D. L. & Fisher, D. L. (2016). SPIDER: A Framework for Understanding Driver Distraction. *Human Factors*, 58(1), 5-12.
- Strayer, D. L., Turrill, J., Cooper, J. M., Coleman, J. R., Medeiros-Ward, N. & Biondi, F. (2015). Assessing cognitive distraction in the automobile. *Human Factors*, 57(8), 1300-1324.
- Summala, H. (1980). How does it change safety margins if overtaking is prohibited: a pilot study. *Accident Analysis & Prevention*, 12(2), 95-103.
- Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31(4), 491-506.
- Summala, H. (2005). Traffic Psychology Theories: Towards Understanding Driving Behaviour and Safety Factors. *International Conference of Traffic and Transport Psychology*.

- Summala, H., Leino, M. & Vierimaa, J. (1981). Drivers' steering behavior when meeting another car: the case of perceptual tropism revisited. *Human Factors*, 23(2), 185-189.
- Teh, E., Jamson, S., Carsten, O. & Jamson, H. (2014). Temporal fluctuations in driving demand: The effect of traffic complexity on subjective measures of workload and driving performance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22, 207-217.
- Teigen, K. H. (1994). Yerkes-Dodson: A law for all seasons. *Theory & Psychology*, 4(4), 525-547.
- Tischler, M. A. & Renner, G. (2007). Ansatz zur Messung von positivem Fahrerleben. Die Messung von Fahrspaß und Ableitungen für die Fahrzeuggestaltung. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Berichte 2015* (S. 105-117). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Tivesten, E. & Dozza, M. (2014). Driving context and visual-manual phone tasks influence glance behavior in naturalistic driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26, 258-272.
- Toda, Y. & Kageyama, I. (2007). Measuring a Driver's Pleasure during Driving. *Review of Automotive Engineering*, 28, 89-93.
- Triggs, T. J. (1980). The influence of oncoming vehicles on automobile lateral position. *Human Factors*, 22(4), 427-433.
- Triggs, T. J. (1997). The effect of approaching vehicles on the lateral position of cars travelling on a two-lane rural road. *Australian Psychologist*, 32(3), 159-163.
- Tsimhoni, O. & Green, P. (2001). Visual demand of driving and the execution of display-intensive in-vehicle tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45(23), 1586-1590.
- Ulich, E. (2001). *Arbeitspsychologie*. Stuttgart: Schäffer - Poeschel.
- Vaa, T. (2014). From Gibson and Crooks to Damasio: The role of psychology in the development of driver behavior models. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 25, 112-119.
- Vilimek, R., Keinath, A. & Schwalm, M. (2012). The MINI E field study – Similarities and differences in international everyday EV driving. In N. A. Stanton (Hrsg.), *Advances in human aspects of road and rail transport* (S. 363-372). Boca Raton, FL: CRC Press.

- Volkenhoff, T. & Lank, C. (2011). Einsatz eines Fahrsimulators in der Ausbildung von Straßenbauingenieuren. *Profile, AKG-Kundenmagazin, 1*.
- Voß, G. M. I. & Schwalm, M. (2015). Functional Behavioral Adaptations as an Indicator of Drivers' State. In K. Gramann, T. O. Zander & C. Wienrich (Hrsg.), *Tagungsband der 11. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 261-265). Berlin: Technische Universität Berlin.
- Voß, G. M. I. & Schwalm, M. (2017). Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik, 118*.
- Voß, G. M. I. & Schwalm, M. (2019). *Handlungsrelevanz bei Abweichungen von der akzeptierten Fahrleistungsschwelle in automatisierten Fahrsituationen (reAlise)*. Unveröffentlichter Projektbericht.
- Voß, G. M. I., Keck, C. M. & Schwalm, M. (2018). Investigation of drivers' thresholds of a subjectively accepted driving performance with a focus on automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 56*, 280-292.
- Wandtner, B., Schumacher, M. & Schmidt, E. A. (2016). The role of self-regulation in the context of driver distraction: a simulator study. *Traffic Injury Prevention, 17*(5), 472-479.
- Warm, J. S., Dember, W. N. & Hancock, P. A. (1996). Vigilance and workload in automated systems. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and human performance. Theory and applications* (S. 183-200). Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- Waugh, J. D., Glumm, M. M., Kilduff, P. W., Tauson, R. A., Smyth, C. C. & Pillelamarri, R. S. (2000). Cognitive workload while driving and talking on a cellular phone or to a passenger. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 6*, 276-279.
- Werling, M. (2011). Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien. In *Schriftenreihe des Instituts für angewandte Informatik / Automatisierungstechnik, KIT, Band 34*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

- Wickens, C. D. & Carswell, C. M. (2006). Information Processing. In G. Salvendy (Hrsg.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (S. 111-149). Hoboken: John Wiley.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors*, 50(3), 449-455.
- Wickens, C. D. & McCarley, J. (2008). *Applied Attention Theory*. Boca Raton: CRC Press.
- Wikman, A. S., Nieminen, T. & Summala, H. (1998). Driving experience and time-sharing during in-car tasks on roads of different width. *Ergonomics*, 41(3), 358-372.
- Wilde, G. J. S. (1982). The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2, 209-225.
- Wilschut, E. S., Rinkenauer, G., Brookhuis, K. A. & Falkenstein, M. (2005). Effects of visual search task complexity on lane change task performance. *European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport System, Lyon*, 23-32.
- Winner, H. (2012). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2. Auflage). Wiesbaden: Springer
- Wulf, F., Zeeb, K., Rimini-Doring, M., Arnon, M. & Gauterin, F. (2013). Effects of human-machine interaction mechanisms on situation awareness in partly automated driving. In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems-(ITSC)*, (S. 2012-2019). IEEE.
- Yagil, D. (2001). Reasoned action and irrational motives: A prediction of drivers' intention to violate traffic Laws. *Journal of Applied Social Psychology*, 31(4), 720-739.
- Yerkes, R. M. & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459-482, 1908
- Young, K. & Regan, M. (2007). Driver distraction: A review of the literature. In: I. J. Faulks, M. Regan, M. Stevenson, J. Brown, A. Porter & J. D. Irwin (Hrsg.), *Distracted driving* (S. 379-405). Sydney, NSW: Australasian College of Road Safety.

- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Attention and automation: new perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 178-194.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2007). Back to the future: Brake reaction times for manual and automated vehicles. *Ergonomics*, 50(1), 46-58.
- Young, M. S., Mahfoud, J. M., Walker, G. H., Jenkins, D. P. & Stanton, N. A. (2008). Crash dieting: The effects of eating and drinking on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 142-148
- Zimmer, A. (1997). *Das Problem der Risikowahrnehmung von Verkehr-Das Beispiel Massenunfälle*. Abgerufen am 20.12.2018. Verfügbar unter <https://epub.uni-regensburg.de/10127/1/massen2.pdf>
- Zomotor, A., Braess, H. H. & Rönitz, R. (1998). Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, 100(3), 236-243.

Anhang

Anhang A Attributliste der Literaturrecherche in Studie 2 zur Beschreibung des Konstrukts subjektiv angemessen empfundene Fahrleistung

(nicht) akzeptabel	ausreichend (Spurhaltung)
abgelenkt/ablenkend	ausreichende Fähigkeiten zur Unfallvermeidung
abgeneigt	äußerst gering
abweichend	beansprucht
abweichend (gegenüber Erwartungen)	bediensicher
aggressiv	befriedigend
aggressiv (Verhaltensweisen)	behäbig
agil	beherrschbar
akzeptabel	behindernd (Einsatz eigener Fähigkeiten)
alltäglich	bekannt (wissenschaftlich)
Anforderungshöhe an den Fahrer	bequem
angemessen	Besorgnis hervorrufend
angemessen (Fahrsituation)	besorgt
angemessen (gemessen an eigenem Fahrkönnen)	blockiert
angemessen (gemessen an Eigenschaften des Fahrzeugs)	derzeit optimal
angemessen (in Bezug auf antizipierte Situation)	direkt
angemessen (in Bezug auf die Leistung anderer Verkehrsteilnehmer)	Dringlichkeit von Korrekturen (Fahrkorrektur)
angemessen (Konfliktlösung)	effektiv
angenehm	einfach
angespannt	einschränkend (soziale Umgebung)
Angst	emotional anspannend
Angst vor Unfall	energiegeladene Erregung
angstauslösend	entlastend
angstauslösend (Situation)	entlastet
ängstlich	erfahren (Fahraufgabe lösbar mit vorhandener Erfahrung)?
ängstlich (Abwehrhaltung)	erfahren (Mangel)
ängstlich (Befürchtungen)	erfahren (mangelnd/bisherig)
antizipatorisch (Güte der Fahrspurwahl)	erforderlich (korrigierende Maßnahmen)
antizipatorisch (tatsächliche und Erwartung)	erforderlich (Lenkbewegungen)
Anwendung präventiver Maßnahmen	erfüllend (persönliche Motive)
aufmerksam	erhebliche Befürchtungsängste
aufregend	ermüdend
ausbrechend	ernstzunehmen
ausbruchsicher	erregt
ausreichend (Fahrspurhaltung)	erwartungskonform
ausreichend (Radien)	exakt

erregt	harmonisch (Richtungsänderung)
erwartungskonform	hart
exakt	illusorisch (Sicherheit)
fähig, unfähig Fahrfähigkeit einzuschätzen	instabil
fahrsicher	intentional
fehlerhaft	interessant (Inhalt der Aufgabe)
fehlerhaft (Spurwahl)	irritierend
flattrig	irritiert
fließend	kalkulierbar
flott	kantig
fokussiert	katastrophal
fragwürdig	Katastrophenpotenzial (Unfall)
frei	komfortabel
freiwillig (Risiköbernahme)	kompetent
früher (Ängste)	kompetent um Situation zu lösen (Selbsteinschätzung)
frustrierend	komplex
frustriert	konditionssicher
funktional (System)	konservativ
Furcht hervorrufend	Kontrollbesitz (über den Ausgang der Situation)
furchtauslösend (Situation)	Kontrolle besitzend (Fahrsituation)
geeignet (Lösung der Transportaufgabe)	Kontrolle besitzend (Fahrzeug)
gefährlich	kontrollierbar
gefährlich (objektive Verletzungsgefahr)	kontrolliert
gefährlich (subjektive Verletzungsgefahr)	kontrolliert (Fahrzeug)
gelangweilt	kontrolliert (Verkehrssituation)
gelegentlich (Befürchtung)	konzentriert
genau	konzentriert (auf die Fahraufgabe)
genau (Ziel)	konzentriert (Verlust)
genügend	korrektiv (Notwendigkeit)
genussvoll (Fahren)	kritisch
gering	langsam
gleichmäßig	langweilig
gleitend	lebensverkürzend
glücklich	lebhaft
grenzwertig	leicht
griffig	leicht (Befürchtungsängste)
gröber (Angst)	Leidensdruck hervorrufend
groß	mangelhaft
gut	monoton
gut aufgehoben sein	nervös
gut wahrnehmbar	nicht akzeptabel
handlich	nicht kontrollierbar
harmlos	noch gut
harmonisch	normal

notwendig (Fahrkorrekturen)	sehr schlecht
notwendig (kompensatorische Regelungen)	sicher
notwendig (körperliche Ausgleichshandlungen)	sicher (Fahrlinienwahl)
notwendig (korrektive Handlungen/Bewegungen)	sicher (Halten)
notwendig (korrektive Lenkbewegungen)	sicher (Lösung der Gefahrensituation)
notwendig (schnelle Lenkbewegungen)	sicher erlebt
objektiv gefährlich	solide
panisch	souverän (Fahrlinienwahl)
plötzlich	spaßig (fahren)
potenziell gefährlich (Gefahrenniveau)	sportlich
praktisch	spritzig
präzise	spursicher
problemlos	stabil
provokierend (Aggressionen)	stabil (Lenkmuster)
rasant	stark
reaktionsschnell	steuerbar
reaktionstüchtig	störungsfrei
rechtzeitig (Reaktion)	stressig
risikoreich	stressig (Empfinden allgemein)
risikoreich (schwerwiegende Verletzungen)	träge
risikoreich (subjektiv)	übereinstimmend (mit akzeptierten Unfallrisiko)
riskant	übereinstimmend (mit dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer in der gleichen Situation)
ruckend	übereinstimmend (mit Erfahrungen aus früheren Situationen)
rücksichtsvoll	übereinstimmend (mit gewollter Kurswahl)
ruhig	übereinstimmend (mit gewünschter Fahrleistung)
rutschend	überflutend (Angst)
schadensschwer	überfordernd
schlecht	überfordert
schleudernd	überrascht
schlicht	übereinstimmend (Sichern)
schlingend	überzeugend
schnell	umständlich
schnittig	unangenehm
schreckauslösend (Situation)	unbekannt
schwammig	unfallwahrscheinlich
schwer	ungewöhnlich (Bewegungszustand)
schwer (Ängste in Anamnese)	unkomfortabel
schwerfällig	unkontrollierbar
schwergängig	unmerklich
schwierig (Fahren)	unpraktisch
sehr gering	unruhig
sehr gut	unsicher

unsicher (Halten des Fahrzeugs auf der Straße)
unsicher (in jeder Situation)
unsicher, angsterregend
unsichere Situation möglich/wahrscheinlich
unsportlich
unterschätzt (Situationen)
unvorhersehbar
unzureichend (Spurhaltung)
verärgert
Verärgerung anderer Verkehrsteilnehmer hervorrufend
verlässlich
Vertrauen (in die Aufgabenerfüllung)
vertrauensvoll
vertraut
völlig ungenügend
vorhersehbar
wackelig
wahrscheinlich (Unfall)
weich
wendig
wohlbefindlich
Wunsch nach Fahrkorrekturen
zögerlich (Fahrstil)
zufrieden
zufriedenstellend
zügig
zurückgreifend (auf eigene Erfahrung)
zuverlässig

**Anhang B Attributliste der Online-Studie in Studie 2 zur Beschreibung des
Konstrukts subjektiv angemessen empfundene Fahrleistung**

abgelenkt	gerade
abwechselnd	geradeaus
Adrenalin hervorrufend	geradlinig
angstprovozierend	geregelt
aufmerksam	gewagt
ausbrechend	gleichgültig
ausgeglichen	gleichmäßig
ausschweifend	hin und herschwenkend
balanciert	ignorant
beeinflusst	inhomogen
beeinträchtigt	inkonsistent
beherrscht/die Situation beherrschend	instabil
besonnen	intuitiv
bewusst	irritierend/irritiert
direkt	komfortabel
diszipliniert	konsequent
dynamisch	konstant
eindeutig	kontinuierlich
einhändig	kontrastreich
einschläfernd	kontrolliert
erfahren	konzentriert
ermüdend	korrigierend
erschöpft	kurvig
fähig	langsam
fähig (Spurhaltung)	langweilig
fahrbahnabweichend	leichtfertig
fahrlässig	leichtsinnig
fehlerhaft	müde
fit	mutwillig
fließend	nervös
flüssig	normal
fremdgefährdend	nüchtern
fröhlich	ordentlich
gefährdend	pendelnd
gefährdend (andere Verkehrsteilnehmer)	plichtbewusst
gefährlich	präzise
gekonnt	provokant
gelangweilt	qualitativ
gelassen	richtungstreu
genau	risikoreich

riskant	unvermögend
rücksichtslos	unvorsichtig
rücksichtsvoll	verantwortungsvoll
ruhig	vergnüglich
ruppig	verrückt
rutschend	vorausschauend
rutschig	voraussehbar
schlangenlinienfahrend	vorbildlich
schlecht	vorschriftsmäßig
schlenkernd	vorsichtig
schleudernd	waghalsig
schlingernd	wechselnd (ständig)
schnell	weitblickend
schwammig	zufriedenstellend
schwankend	
schwingend	
sicher	
slalommäßig	
spaßig	
spielend	
spielerisch	
spurgenau	
spurhaltend	
spursicher	
spurtreu	
stabil	
stetig	
übermüdet	
übernächtigt	
umsichtig	
unachtsam	
unaufmerksam	
unerfahren	
unfähig	
unfallgefährlich	
ungelenkt	
ungenau	
ungeübt	
unkonzentriert	
unmotiviert	
unruhig	
unsicher	
unverantwortlich	

Anhang C Finale Attributliste des Expert Card Sortings in Studie 2 zur Beschreibung des Konstrukts subjektiv angemessen empfundene Fahrleistung

abgelenkt/ablenkend	gut
abgeneigt	gut aufgehoben
abweichend	handlich
aggressiv	harmonisch
akzeptabel	intentional
alltäglich	interessant
angemessen	intuitiv
angenehm	irritierend/irritiert
angespannt	kantig
angstauslösend	katastrophal
aufmerksam	komfortabel
aufregend	kompetent
ausbrechend	komplex
ausgeglichen	konservativ
beanspruchend	konstant
beeinträchtigt	kontrastreich
behäbig	kontrolliert
beherrschbar	konzentriert
belastend	korrigierend
bequem	kritisch
besonnen	kurvig
blockiert	langweilig
diszipliniert	lebhaft
dynamisch	leichtfertig
effektiv	monoton
einfach	nervös
ermüdend	notwendig (Fahrkorrekturen)
erwartungskonform	optimal
fähig	panisch
fahrlässig	plötzlich
fehlerhaft	praktisch
fließend	präzise
frustrierend	problemlos
funktional	provokant
gefährlich	rasant
geradlinig	reaktionsschnell
geregelt	rechtzeitig
gleichgültig	richtungstreu
gleichmäßig	riskant
grenzwertig	ruckend

rücksichtsvoll
ruhig
schlicht
schlingernd
schnell
schwammig
schwer
schwerfällig
schwingend
sicher
souverän
spaßig
sportlich
spurhaltend
stressig
träge
überfordert
überzeugend
umständlich
unerfahren
unfallwahrscheinlich
verantwortungsvoll
verärgert
vertraut
vorausschauend
vorbildlich
vorhersehbar
vorschriftsmäßig
vorsichtig
wacklig
weich
wendig
zögerlich
zufriedenstellend
zuverlässig

Anhang D Kriterien schlechter Fahrleistung für Längs- und Querführung gemäß Studie 2

Tabelle 25

Kriterien schlechter Längsführung (sortiert nach Häufigkeit) gemäß Studie 2

Zu dichtes Auffahren auf Vorderfahrzeug
Häufiger Wechsel Bremsen/Beschleunigen
Ruckartige/abrupte Bremsung
Zu langsames Fahren/Limit-Unterschreitung
Sehr/zu starke Beschleunigung
Kein vorausschauendes Fahren (z. B. zu spätes Bremsen)
Zu schnelles Fahren (in Baustellen/unangepasst)
Sehr/zu starke Bremsung
Überholen mit geringer Differenzgeschwindigkeit
Unkomfortable Gangwechsel
Zu schnelles Fahren/Limit - Überschreitung
Konstantfahrt mit hoher Drehzahl/niedrigem Gang
Zu früh/spät Gangwechsel
Ungenauere Dosierung über Gaspedal
Zu weit vor Ampel halten
Zu viel Abstand zu Vorderfahrzeug
Große Schwankungen beim Folgeabstand
Zu schnell in schwer einsehbaren Kurven
Sehr langsames Beschleunigen an Ausfahrten
Lange Schaltpausen
Progressives Bremsen
Unverhältnismäßige Reaktion auf Manöver des Vorderfahrzeugs
Unstetige Übergänge von Brems-/ Beschleunigungsmanövern (kein Ausrollen)
Mangelnde Leistung beim Beschleunigen
Mangelnde Leistung beim Bremsen
Geringe Beschleunigung
Lautes Motordröhnen
Hohe Relativgeschwindigkeit
Schlechtes Folgeverhalten
Hohe Totzeit zwischen Eingabe Fahrerwunsch und Reaktion des Fahrzeugs
Höchstgeschwindigkeit geringer als 180 km/h
Schwingungen beim Beschleunigen
Verzögerte Reaktion auf Gaspedal
Zu großer Antriebs-/Bremschlupf
Gierreaktion des Fahrzeugs auf Split
Stark wahrnehmbarer Schaltvorgang (Ruckeln)
Starke Nickbewegung

Tabelle 26

Kriterien schlechter Querführung (sortiert nach Häufigkeit) gemäß Studie 2

Häufige Lastwechsel
Schlechte Spurhaltung/Pendeln in Spur/links-rechts
Überfahren der Seitenlinie
Ruckartige/abrupte Lenkbewegungen
Kurvenschneiden
Schlangenlinien
Ungleichmäßige Lenkbewegungen
Weites Ausholen vor Kurven/ Radius falsch einschätzen
Abrupte Spurwechsel/ Ausscheren (besonders auf Autobahnen)
Sich aus Kurven heraustragen lassen
Zu geringes/ zu starkes Lenken → viele Korrekturen
Hohe Wankbewegungen
Abdriften
Lenkrad loslassen
Seitenabstand zu gering
Wenig vorausschauende Fahrweise
Geringer antizipatorischer Anteil
Unsanfte Übergänge der Lenkmanöver
Übersteuerungstendenz
Untersteuerungstendenz
Geringe Rückmeldung der Querkräfte
Indirektes Fahrverhalten (langsame Reaktion auf Lenkbefehl)
Großes Spiel in der Lenkung
Schlechtes Kurvenverhalten
Haftungsverlust
Zu schnelles/langsames (Gang) schalten
Rechtsfahrgebot missachten
Nicht direkter Zusammenhang zwischen Lenkwinkel und Reaktion

Anhang E Offene Kommentare in der Hauptstudie der Studie 5

Tabelle 27

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei Eingriff ($n = 1$) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Misstrauen/Kontrollverhalten ($n = 1$)	Lenkbewegung/Ausweichen ($n = 1$)	<ul style="list-style-type: none"> „Ich wollte ins Lenkrad greifen, falls etwas passiert, sodass ich das Auto korrigieren kann.“

Tabelle 28

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff ($n = 59$) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Sicherheit/keine Gefahr ($n = 27$)		<ul style="list-style-type: none"> „Habe Auto eine Minute lang kommen sehen, Auto ist gerade auf eigener Spur gefahren, der Gegenverkehr auch.“ „Normale Straßenführung, Fahrzeug kam nicht rüber, keine gefährliche Situation, in die man hätte eingreifen müssen.“ „Es ging geradeaus, habe kein Risiko gesehen; bin ja nicht auf das Fahrzeug zugesteuert.“
Genügend Platz ($n = 14$)		<ul style="list-style-type: none"> „Fahrzeug war weit genug von der Mittellinie entfernt.“ „Das Fahrzeug war auf der Gegenfahrbahn und meine Bahn war frei.“ „Seitenabstand und Spurentreue waren gegeben; war nicht nötig einzugreifen“
Keine Notwendigkeit (nicht weiter differenziert) ($n = 14$)		

Vertrauen in System (n = 4)	<ul style="list-style-type: none"> • „Ich habe registriert, dass die Automatik das System beherrscht, aber ich war in Bereitschaft.“ • „Ich war mir sicher, dass das System funktioniert; war eine gerade Strecke, keine anderen Einflüsse, normale Verhältnisse.“
-----------------------------	--

Tabelle 29

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.35 m bei Eingriff (n = 1) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Zu wenig Platz/Unsicherheit (n = 1)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 1)	<ul style="list-style-type: none"> • „War zu nah am Gegenverkehr.“

Tabelle 30

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.35 m bei keinem Eingriff (n = 59) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Sicherheit/keine Gefahr (n = 21)		<ul style="list-style-type: none"> • „Beide Fahrzeuge waren in ihrer Spur, von daher keine Gefahr.“ • „Es schien, dass das Auto gut vorbeikommt; kein Bedarf einzugreifen, Geschwindigkeit gut, genug Zeit zum Einschätzen.“ • „Mein Fahrzeug hatte eine gute Straßenlage und war auf einem geraden Streckenabschnitt.“
Genügend Platz (n = 15)		<ul style="list-style-type: none"> • „War immer noch genug Platz.“ • „Gegenverkehr ist in seiner Spur gefahren.“ • „Ausreichend Sicherheitsabstand, Spur wurde gehalten.“
Keine Notwendigkeit (nicht weiter differenziert) (n = 15)		

Vertrauen in System ($n = 7$)

- „Habe dem Auto vertraut, dass es der Spur folgt.“
- „Ich habe registriert, dass das System weiterarbeiten kann.“
- „Ich wollte den Fahrassistenten nicht ausschalten.“

Tabelle 31

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff ($n = 29$) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Fehlverhalten des Gegenverkehrs ($n = 18$)	Lenkbewegung/Ausweichen ($n = 18$)	<ul style="list-style-type: none"> • „Gegenverkehr hat Mittellinie überfahren und war auf meiner Spur.“ • „Ich war relativ weit links auf meiner Spur und Gegenverkehr fuhr auf meiner Spur.“ • „Fahrweise des Gegenverkehrs war etwas unsicher.“
Gefahr einer Kollision ($n = 6$)	Lenkbewegung/Ausweichen ($n = 5$) Gas wegnehmen ($n = 1$)	<ul style="list-style-type: none"> • „Verkehr war auf meiner Spur. Dachte, es kommt zum Unfall.“ • „Seitenabstand war nicht mehr gegeben. Es hätte zur Kollision führen können.“
Zu wenig Platz/Unsicherheit ($n = 4$)	Lenkbewegung/Ausweichen ($n = 3$) Gas wegnehmen ($n = 1$)	<ul style="list-style-type: none"> • „Ich war unsicher, ob Autos an einander vorbei passen.“ • „Es war zu eng, ich wollte mehr Sicherheitsabstand. Der Gegenverkehr fuhr zu mittig, ich zu weit links.“
Misstrauen/Kontrollverhalten ($n = 1$)	Lenkbewegung/Ausweichen ($n = 1$) Bremsung ($n = 1$)	<ul style="list-style-type: none"> • „Habe dem System nicht vertraut. Habe mich gefragt, ob es ausweichen kann.“

Tabelle 32

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei keinem Eingriff (n = 29) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Genügend Platz (n = 16)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich konnte abschätzen, dass es mit den Außenspiegeln noch passt.“ • „Habe zum Lenkrad gegriffen, weil es knapp war, aber der Platz schien ausreichend, also habe ich nicht gelenkt.“
Sicherheit/keine Gefahr (n = 6)		<ul style="list-style-type: none"> • „Gegenverkehr war noch auf seiner Spur, mein Fahrzeug war noch mittig, von daher keine Gefahr.“ • „Abschätzung von Geschwindigkeit und Versatz hat keine Kollisionsgefahr bedeutet.“ • „Gegenverkehr fuhr zwar hart an der Mittellinie, aber er hätte eine ruckartige Bewegung machen müssen, damit es zum Crash gekommen wäre.“
Vertrauen in System (n = 3)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich habe das System als stabil eingeschätzt.“ • „Das System wird schon besser wissen, was es tut.“ • „Noch habe ich dem Ganzen vertraut.“
Keine Notwendigkeit (nicht weiter differenziert) (n = 3)		

Tabelle 33

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei Eingriff (n = 35) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Zu wenig Platz/Unsicherheit (n = 26)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 20)	<ul style="list-style-type: none"> • „Das Fahrzeug war zu weit auf meiner Spur und mit der Baustelle auf der rechten Seite hätte es nicht gepasst.“ • „Rechts war mehr Platz als links, also habe ich nach rechts gelenkt.“ • „Ich hatte keine Vorfahrt.“
	Bremsung (n = 10)	
	Gas wegnehmen (n = 1)	
Gefahr einer Kollision (n = 6)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 3)	<ul style="list-style-type: none"> • „Eigenes Fahrzeug hat nicht abgebremst und weil wir sonst kollidiert wären.“ • „Ich hatte den Eindruck, das andere Fahrzeug zu berühren.“ • „Ich wäre entweder in Baustelle gefahren oder ins Auto.“
	Bremsung (n = 3)	
Fehlverhalten des Gegenverkehrs (n = 2)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 2)	<ul style="list-style-type: none"> • „Gegenverkehr war auf meiner Fahrbahn, sehr weit auf Mittellinie.“ • „Ich habe befürchtet, dass der Gegenverkehr auf meine Spur kommt.“
Misstrauen/Kontrollverhalten (n = 1)	Bremsung (n = 1)	<ul style="list-style-type: none"> • „Ich wusste nicht, ob das System automatisch brems.“

Tabelle 34

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Baken bei keinem Eingriff (n = 21) in der Hauptstudie der Studie 5

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Vertrauen in System (n = 5)		<ul style="list-style-type: none"> • „Fahrt fuhr absolut gesteuert und gleichmäßig auf Engstelle zu. Es schien, als würde es passen, habe der Automatik vertraut.“ • „Ich habe dem System und meiner Erfahrung vertraut, dass die Schilder genug Platz lassen.“
Genügend Platz (n = 4)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich kam vorbei und durch, genug Platz trotz Baken und Auto.“ • „Es hat gerade noch gepasst, man musste nicht eingreifen.“ • „Hab gesehen, dass es passt.“
Sicherheit/keine Gefahr (n = 4)		<ul style="list-style-type: none"> • „Abschätzung des Kollisionsrisikos unter Einbezug der Fahrbahnverengung ergab keine Kollisionsgefahr.“ • „Sicherheitsgefühl hat gepasst, Abstand okay.“ • „Fühlte sich trotz Gegenverkehr und Engstelle sicher an.“
Eingriff hätte Situation verschlimmert/keine Möglichkeit des Eingriffs (n = 3)		<ul style="list-style-type: none"> • „Auto passte in vorgegebener Position am besten; rechts und links kein Platz.“ • „Ich hätte nach rechts ausweichen wollen, ging aufgrund von Baken aber nicht.“
Keine Notwendigkeit (nicht weiter differenziert) (n = 3)		

Anhang F Offene Kommentare in der Hauptstudie der Studie 6

Tabelle 35

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei Eingriff (n = 1) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Hindernis (n = 1)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 1)	<ul style="list-style-type: none"> „Habe Hindernis gesehen und wollte ausweichen.“

Tabelle 36

Offene Kommentare im Szenario Abstand 0.85 m bei keinem Eingriff (n = 28) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Kein Grund/Keine Notwendigkeit (n = 9)		<ul style="list-style-type: none"> „Habe Situation eingeschätzt – dachte nicht, dass Lenken notwendig ist (beim Ton kurz hochgeguckt bzw. auch kurz erschreckt).“ „Ich war vorbereitet und habe abgewartet, habe festgestellt, dass es klappt, und habe nicht eingegriffen.“
Gute Spurposition (n = 8)		<ul style="list-style-type: none"> „Fahrzeug war relativ mittig/gut auf der Straße.“ „Wir sind relativ mittig in der Spur gefahren, ich sah keine Gefahr.“
Genügend Abstand/Platz (n = 5)		<ul style="list-style-type: none"> „Es war vom Abstand her alles gut. Ich habe nicht eingegriffen, sondern nur aufgepasst.“ „Es war genügend Abstand zur mittleren Begrenzungslinie.“
Keine Gefahr/Sicherheit (n = 4)		<ul style="list-style-type: none"> „Einschätzung, dass der Gegenverkehr keine Gefahr darstellt.“ „Ich fühle mich sicher – , Urvertrauen.“
Situation in Ordnung (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> „Ich habe die Situation so bewertet, dass sie in Ordnung ist.“

Tabelle 37

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei Eingriff (n = 10) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Fehlverhalten des Gegenverkehrs (n = 5)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 18) Bremsung (n = 1)	<ul style="list-style-type: none"> • „Fahrzeug war in meiner Spur, mein Fahrzeug hat nicht automatisch nach rechts gelenkt.“ • „Entgegenkommendes Fahrzeug war auf meiner Spur. Ich wollte sicher gehen.“
Gefahr einer Kollision (n = 4)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 4)	<ul style="list-style-type: none"> • „Fahrzeug war (fast) auf meiner Spur. Ich dachte, es kommt zum Unfall.“ • „Ich wollte nicht, dass das entgegenkommende Fahrzeug mich nicht sieht und um den Abstand zwischen den Fahrzeugen zu halten.“
Schlechte Spurposition (n = 1)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 1)	<ul style="list-style-type: none"> • „Falsche Ausrichtung unseres Fahrzeuges – es war zu eng zum Gegenverkehr.“

Tabelle 38

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m bei keinem Eingriff (n = 4) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Genügend Abstand/Platz (n = 2)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich dachte, das passt noch, auch wenn es knapper war als vorher. Wenn ich selber gefahren wäre, wäre ich vermutlich ein Stück weiter rechts gefahren.“ • „Ich habe mit einem Blick festgestellt, dass der Abstand reicht.“
Keine Kollision erwartet (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich war eingriffsbereit und hatte Hände am Lenkrad. Nach dem Ton habe ich die Situation geprüft – war zwar eng, aber ich habe keinen Unfall erwartet.“
Situation in Ordnung (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> • „Ich habe gesehen, dass das noch im Rahmen ist.“

Tabelle 39

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei Eingriff (n = 10) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Schlechte Spurposition (n = 3)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 3)	<ul style="list-style-type: none"> „Spur passte nicht – wir wären ins Auto gefahren.“
	Bremmung (n = 2)	<ul style="list-style-type: none"> „War für mich zu nah am entgegenkommenden Fahrzeug.“
Gefahr einer Kollision (n = 3)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 3)	<ul style="list-style-type: none"> „Unfallvermeidung.“ „Ich dachte, die Fahrzeuge touchieren sich, deshalb auch Lenkung.“
Fehlverhalten Gegenverkehr (n = 2)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 2)	<ul style="list-style-type: none"> „Auto war auf eigener Spur.“ „Gegenverkehr war auf meiner Spur.“
Zu wenig Platz (n = 2)	Lenkbewegung/Ausweichen (n = 2)	<ul style="list-style-type: none"> „Hindernis (Pylonen rechts) waren relativ nah. Fahrzeug fuhr zu weit links (zumindest nicht mittig). Dadurch war es links zu eng.“
	Bremmung (n = 1)	

Tabelle 40

Offene Kommentare im Szenario Abstand -0.15 m + Pylone bei keinem Eingriff (n = 5) in Studie 6

Begründung des Verhaltens	Beschreibung des Verhaltens	Beispiel
Genügend Abstand/Platz (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> „Ich war der Meinung, dass genug Platz war.“
Gute Spurposition (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> „Ich hatte das Gefühl, dass wir zwischen den Hindernissen recht mittig waren. Ich habe das Spiel unterbrochen und Hand trotzdem am Lenkrad gehabt.“
Situation in Ordnung (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> „War am Grenzbereich, aber noch in Ordnung.“
Kein Grund/Keine Notwendigkeit (n = 1)		<ul style="list-style-type: none"> „Ich hatte das Gefühl, da passiert nichts, weil es ein Balloon-Car war. Bei meinem Fahrzeug und im realen Verkehr hätte ich definitiv eingegriffen. Auch bei Mensch und Tier sofortiger Eingriff.“

Vertrauen in System ($n = 1$)

- „Ich war kurz vor einem Eingriff, weil es zu eng war. Kein Eingriff, da ich Vertrauen in das System hatte.“
-