

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung -Teil 1-

Tobias Vogelpohl

Mark Vollrath

Matthias Kühn

Thomas Hummel

Tina Gehlert

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung

Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten

M. Sc. Tobias Vogelpohl
Prof. Dr. Mark Vollrath
Dr.-Ing. Matthias Kühn
Dipl.-Ing. Thomas Hummel
Dr. rer. nat. Tina Gehlert

Impressum

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin

Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

E-Mail: unfallforschung@gdv.de

Internet: www.udv.de

Facebook: www.facebook.com/unfallforschung

Twitter: [@unfallforschung](https://twitter.com/unfallforschung)

YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

ISBN-Nr.: 978-3-939163-67-1

Redaktion: Dr.-Ing. Matthias Kühn

Bildnachweis: UDV und siehe Quellenangaben

Erschienen: 08/2016

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV)

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung

Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten

Bearbeitet durch:

Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie
Institut für Psychologie
M. Sc. Tobias Vogelpohl
Prof. Dr. Mark Vollrath



Bei der UDV betreut von:

Dr.-Ing. Matthias Kühn
Dipl.-Ing. Thomas Hummel
Dr. rer. nat. Tina Gehlert



Inhalt

Zusammenfassung	9
Abstract	10
1. Hintergrund und Ziele des Projekts	11
2. Mensch-Maschine Interaktion in automatisierten Systemen	13
2.1. Einleitung	13
2.2. Konzepte der Automationspsychologie	13
2.2.1. Ironies of Automation/Clumsy Automation	13
2.2.2. Supervisory Control	14
2.2.3. Situationsbewusstsein	15
2.2.4. Automation Bias	15
2.2.5. Vertrauen in Automation	16
2.2.6. Complacency/Overreliance	17
2.3. Stufen der Automatisierung	17
2.4. Menschliche Leistungsfähigkeit bei der Interaktion mit automatisierten Systemen	22
2.5. Fazit	28
3. Übergabe von Automation zu manueller Steuerung: Take Over Requests	30
3.1. Automation von Fahrfunktionen im Fahrzeug	30
3.2. Review bisheriger Studien zu Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt zu manueller Steuerung	34
3.2.1. Review Kriterien	34
3.2.2. Toffetti, Wilschut, Martens, Schieben, Rambaldini, Merat & Flemisch (2009)	35
3.2.3. Damböck, Farid, Töner & Bengler (2012)	36
3.2.4. Merat, Jamson, Lai & Carsten (2012)	39
3.2.5. Damböck (2013)	40
3.2.6. Gold, Damböck, Bengler & Lorenz (2013)	43
3.2.7. Gold, Damböck, Lorenz & Bengler (2013)	45
3.2.8. Helldin, Falkman, Riveiro & Davidsson (2013)	47
3.2.9. Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr & Mergl (2013)	49
3.2.10. Wulf, Zeeb, Rimini-Döring, Arnon & Gauterin (2013)	51
3.2.11. Brandenburg & Skottke (2014)	52
3.2.12. Dogan, Deborne, Delhomme, Kemeny & Jonville (2014)	53
3.2.13. Lorenz, Kerschbaum & Schumann (2014)	54
3.2.14. Merat, Jamson, Lai, Daly & Carsten (2014)	55
3.2.15. Naujoks, Mai & Neukum (2014)	56
3.2.16. Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid & Bengler (2014)	57
3.2.17. Shen & Neyens (2014)	59

3.2.18.	Strand, Nilsson, Karlsson & Nilsson (2014)	60
3.2.19.	Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr, Josten & Eckstein (2015).....	62
3.2.20.	Zeeb, Buchner & Schrauf (2015)	64
3.2.21.	Louw, Merat & Jamson (2015).....	66
3.2.22.	Gold, Körber, Lechner & Bengler (2015).....	68
3.2.23.	Melcher, Rauh, Diederichs, Widroither & Bauer (2015).....	69
3.3.	Zusammenfassung der Literaturübersicht	70
4.	Studie zur Dauer der Wiederherstellung vollständiger motorischer und kognitiver Kontrolle über das Fahrzeug nach einer hochautomatisierten Fahrt.....	81
4.1.	Motivation.....	81
4.2.	Fragestellungen, Hypothesen und Versuchsdesign.....	83
4.3.	Methodik	84
4.3.1.	Use Case-Analyse und Gestaltung realistischer Fahr-Szenarien	84
4.3.2.	Fähigkeiten und Grenzen der simulierten Automation	87
4.3.3.	Auswahl einer fahrfremden Tätigkeit für die Fahrer „out-of-the-loop“.....	90
4.3.4.	Versuchsablauf und Instruktion der Probanden	91
4.3.5.	Definition der gemessenen objektiven Parameter	92
4.3.5.1.	Messzeitpunkte und Reaktionszeiten	93
4.3.5.2.	Fahrdaten.....	94
4.3.5.3.	Blickbewegungsdaten und Beobachtungskameras	95
4.3.6.	Definition der subjektiven Messwerte aus Fragebogendaten.....	96
4.3.6.1.	Vertrauen	97
4.3.6.2.	Komfort	97
4.3.6.3.	Kontrollierbarkeit und Beanspruchung.....	98
4.4.	Beschreibung der Stichprobe	98
4.5.	Ergebnisse	99
4.5.1.	Fragebogendaten	99
4.5.2.	Erste Reaktionen auf den TOR und auf das Event.....	100
4.5.3.	Reaktionszeiten.....	102
4.5.4.	Fahrdaten.....	109
4.6.	Diskussion.....	115
4.6.1.	Stichprobe und Versuchsbedingungen	116
4.6.2.	Fragebogendaten	118
4.6.3.	Erste Reaktionen auf den TOR und das Event.....	119
4.6.4.	Reaktionszeiten.....	119
4.6.5.	Fahrdaten.....	123
5.	Zusammenfassung und Empfehlungen	126

6. Literatur.....	128
7. Anhang.....	141
7.1. Zusammenfassung Experten-Interviews Übernahmeszenarien und automatisiertes Fahren	141
7.2. Fragebogen zur Bewertung der Anforderungen an ein Spiel als ablenkende Nebenaufgabe beim automatisierten Fahren	144
7.3. Instruktionen für die Trainingsfahrt	146
7.4. Instruktionen für die Versuchsfahrten	147
7.4.1. Instruktionen für die Gruppe <i>Manuell</i>	147
7.4.2. Instruktionen für die Gruppe <i>Überwacht</i>	147
7.4.3. Instruktionen für die Gruppe <i>Lesen</i>	148
7.4.4. Instruktionen für die Gruppe <i>Spiel</i>	149
7.5. Fragebogen zu Vertrauen in automatisierte Fahrerassistenzsysteme	151
7.6. Fragebogen zu Diskomfort bei der Verwendung von automatisierten Fahrerassistenzsystemen	153
7.7. Fragebogen zu Kontrollierbarkeit und Beanspruchung nach jeder Übernahmesituation.....	155
7.8. Ergänzende Darstellungen der Reaktionen auf den TOR für die einzelnen Versuchsgruppen.....	157
.....	157
7.9. Ergänzende Darstellungen der Reaktionen auf den TOR für die einzelnen Szenarien	158

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Leistung bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation. Eigene Darstellung, aufbauend auf Wickens und Hollands (2000).	23
Abbildung 2: Mittlere Reaktionszeiten auf einen Systemfehler in Abhängigkeit von der verwendeten Warnmodalität. Modifiziert nach Toffetti et al. (2009), S. 10.....	36
Abbildung 3: Anzahl der Versuchspersonen mit Fehler bei der Aufgabenerfüllung in Abhängigkeit von der Übernahmezeit bzw. bei der Baselinefahrt. Links: Fahrstreifenwechsel auf die Nebenspur (N = 32). Rechts: Fahrstreifenwechsel in eine von einem Straßenschild vorgegebene Richtung (N = 32). Modifiziert nach Damböck et al. (2012), S. 8.	38
Abbildung 4: Einzelphasen des Übernahmevorgangs und deren Dauer, von der Übernahmeaufforderung bis zur Übernahme der Fahraufgabe. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 137.	41
Abbildung 5: Ablaufanalyse des Übernahmevorgangs unter Berücksichtigung von Literaturwerten für Reizverarbeitung, motorische Umsetzung und Orientierung. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 113.	42
Abbildung 6: Mittlere Zeit von der Übernahmeaufforderung bis zur Deaktivierung des Systems (vollständige Übernahme der Fahraufgabe). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit (FBM: Fahrbahnmarkierung fehlt; FBV: Fahrstreifenwechsel auf die Nebenspur; FBT: Fahrstreifenwechsel in eine von einem Straßenschild vorgegebene Richtung). Modifiziert nach Damböck (2013), S. 136.	43
Abbildung 7: Reaktionszeiten der unterschiedlichen Versuchsgruppen. Modifiziert nach Gold et al. (2013a), S. 4.	45
Abbildung 8: Reaktions-Prozeduren. Modifiziert nach Gold et al. (2013b), S. 1940.	47
Abbildung 9: Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Art der Nebenaufgabe. Modifiziert nach Petermann-Stock et al. (2013), S. 17.	50
Abbildung 10: Verteilung der Reaktionsarten auf eine Übernahmeaufforderung zwischen den Versuchsgruppen. Links: Konzept AR green. Mitte: Konzept AR red. Rechts: Kontrollbedingung. Modifiziert nach Lorenz et al. (2014), S. 1684.	55
Abbildung 11: Mittelwerte und Standardabweichungen, sowie Maximalwerte der Reaktionszeiten in den verschiedenen Situationen und Versuchsgruppen. Modifiziert nach Radlmayr et al. (2014), S. 2065.	59
Abbildung 12: Prozess der Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer nach vorheriger Bearbeitung von Nebenaufgaben während einer hochautomatisierten Fahrt; erweiterte Grafik nach Eckstein & Zlocki (2014) mit Inhalten aus Hoffmann & Gayko (2009), Luczak (1975), Donges (2009). Modifiziert nach Petermann-Stock et al. (2015), S. 349.	63
Abbildung 13: Modell der Prozesse während der Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer hochautomatisierten Fahrt mit einer Nebenaufgabe. Modifiziert nach Zeeb et al. (2015), S. 213.	65
Abbildung 14: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichungen für die einzelnen Fahrergruppen. Modifiziert nach Zeeb et al. (2015), S. 218.	66
Abbildung 15: Screenshot eines typischen Spielverlaufs in der als Nebenaufgabe ausgewählten Version des Spiels Tetris.	91
Abbildung 16: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums (Foto: Matthias Powelleit).....	95
Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung des verwendeten Blickbewegungssystem Dikablis bei Probanden mit und ohne Brille. Quelle: Dikablis User Manual (Ergoneers, 2011; S. 20).96	

Abbildung 18: Verteilung der Urteile der Selbsteinschätzung der Versuchsteilnehmer über ihren Kenntnisstand zu automatisiertem Fahren.....	98
Abbildung 19: Mittlere subjektive Bewertung der Kontrollierbarkeit der Übernahme-situation mit Standardabweichungen in den verschiedenen Übernahmeszenarien und Versuchsgruppen.....	99
Abbildung 20: Mittlere Subjektive Bewertungen der Beanspruchung, des Risikos, des Diskomforts und der zeitlichen Beanspruchung in den Übernahmeszenarien mit Standardabweichungen. Höhere Werte indizieren höhere Beanspruchung, höheres Risiko, stärkeren Diskomfort und höhere zeitliche Beanspruchung.....	100
Abbildung 21: Anteilige erste Reaktionen auf den TOR (links) und auf das Event (rechts), sortiert nach Versuchsgruppen.....	101
Abbildung 22: Anteilige erste Reaktionen auf den TOR (links) und auf das Event (rechts), sortiert nach Übernahmeszenarien.....	101
Abbildung 23: Prozentualer Anteil der Reaktion „Ausschalten der Automation“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit.....	102
Abbildung 24: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Straße“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit.....	103
Abbildung 25: Prozentualer Anteil der Reaktion „Hände am Lenkrad“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.....	104
Abbildung 26: Prozentualer Anteil der Reaktion „Fuß an den Pedalen“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.....	105
Abbildung 27: Prozentualer Anteil der Reaktion „Hände am Lenkrad“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.....	105
Abbildung 28: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.....	106
Abbildung 29: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.....	106
Abbildung 30: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.....	107
Abbildung 31: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.....	107
Abbildung 32: Prozentualer Anteil der Reaktion „Bremsreaktion auf das Event“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.....	108
Abbildung 33: Prozentualer Anteil der Reaktion „Bremsreaktion auf das Event“ nach dem Event gemessen an den gefahrenen Metern, sortiert nach Versuchsgruppen.....	108
Abbildung 34: Mittlere Bremspedalstellungen in den Szenarien M02, M03 und M05 für die Versuchsgruppen Überwacht, Lesen, Spiel und Manuell gemessen an jedem Meter nach dem TOR. Das Event wurde in allen Situationen bei Meter 175 ausgelöst.....	110
Abbildung 35: Geschwindigkeitsverläufe gemessen an den Streckenmetern nach dem TOR. Oben links: Versuchsgruppe <i>Überwacht</i> . Oben rechts: Versuchsgruppe <i>Lesen</i> . Unten links: Versuchsgruppe <i>Spiel</i> . Unten rechts: Versuchsgruppe <i>Manuell</i>	111
Abbildung 36: Mediane und 1./3. Quartile des Abstands zum Vorderfahrzeug gemessen an den Streckenmetern nach dem TOR. Oben links: Versuchsgruppe <i>Überwacht</i> . Oben rechts: Versuchsgruppe <i>Lesen</i> . Unten links: Versuchsgruppe <i>Spiel</i> . Unten rechts: Versuchsgruppe <i>Manuell</i> . Das Event wurde bei Meter 175 ausgelöst.....	112
Abbildung 37: Mittlere maximale absolute Querschleunigung und Standardabweichungen zwischen dem TOR und dem Event für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.....	113
Abbildung 38: Anzahl der Fahrten mit den kritischen Ereignissen <i>Kollision</i> , <i>Anhalten</i> und <i>Starkbremsung</i> für die einzelnen Versuchsgruppen. Die kritischen Ereignisse <i>Kollision</i> und	

<i>Anhalten</i> wurden ausschließlich in Szenario <i>M04</i> gefunden, das Ereignis <i>Starkbremsung</i> über alle Szenarien hinweg.	114
Abbildung 39: Mittlere maximale absolute Querschleunigung und Standardabweichungen nach dem Event für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.	114
Abbildung 40: Links: Anteil der Fahrten mit Eingriffen durch die Automation in den Szenarien <i>M02</i> , <i>M03</i> und <i>M05</i> dargestellt für die Versuchsgruppen. Rechts: Mittlere Dauer der Eingriffe durch die Automation in den Szenarien <i>M02</i> , <i>M03</i> und <i>M05</i>	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zehn Stufen der Automatisierung bei der Mensch-Computer Entscheidungsfindung und Handlungsauswahl für einen einzelnen Entscheidungsschritt. Modifiziert nach Sheridan und Verplanck (1978), S. 168.	19
Tabelle 2: Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen und Definition verschiedener Automatisierungsgrade. Modifiziert nach Gasser et al. (2012), S. 31.	21
Tabelle 3: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen Zeitdauern für die einzelnen Übernahmephasen. Die Berechnung basiert auf der Handlungsablaufanalyse des Übernahmeprozesses. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 142.	40
Tabelle 4: Beeinflussende Faktoren für die Dauer und Qualität der Übernahme der manuellen Kontrolle nach einer hochautomatisierten Fahrt.	70
Tabelle 5: Studienüberblick zu Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung.	77
Tabelle 6: Versuchsdesign mit den Faktoren <i>Art der Nebenaufgabe</i> und <i>Art der Übernahmesituation</i>	84
Tabelle 7: Piktogramme zu dem Zustand der Automation.	88
Tabelle 8: Darstellung der für den Fahrsimulator umgesetzten Übernahmeszenarien.	89
Tabelle 9: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichungen (in Klammern) in Sekunden bis zum Abschalten der Automation für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.	103

Zusammenfassung

Fahrzeuge in denen der Fahrer Teilstrecken automatisiert fahren kann und die Fahrt nicht mehr überwachen muss befinden sich derzeit bei vielen Automobilherstellern in der Entwicklung. Wenn diese hochautomatisierten Fahrzeuge Systemgrenzen erreichen muss die manuelle Steuerung an den Fahrer zurückgegeben werden. Hierzu ist es notwendig dem Fahrer einen ausreichenden Zeitraum für die Übernahme der manuellen Kontrolle über das Fahrzeug zur Verfügung zu stellen, damit die Übernahme sicher und komfortabel ablaufen kann. Um die notwendige Dauer für eine sichere Übernahme der manuellen Steuerung durch einen Fahrer zu ermitteln wurden zunächst relevante Konzepte der Automationspsychologie vorgestellt und auf den Kontext im Fahrzeug angewendet. Anschließend wurde eine Analyse der bislang veröffentlichten Studien zu der Dauer der Übernahme der Steuerung aus einer hochautomatisierten Fahrt durchgeführt um erste Hinweise auf eine realistische Übernahmezeit zu erhalten. Aufbauend auf der Analyse der Literatur und Interviews mit Automobilherstellern und Zulieferern wurden unterschiedlich komplexe Übernahme szenarien und Nebenaufgaben entwickelt, die für zukünftige automatisierte Fahrzeuge realistisch und relevant sind. Diese Übernahme szenarien und Nebenaufgaben wurden in einem statischen Fahrsimulator umgesetzt und mit $N = 60$ Probanden im Alter von 20 bis 76 ($M = 36.0$, $SD = 15.2$) Jahren getestet. Probanden waren nach einer hochautomatisierten Fahrt von ca. 5 Minuten, während der sie durch ein motivierendes Spiel auf einem in den Händen gehaltenen Tablet-PC stark abgelenkt waren, grundsätzlich in der Lage die manuelle Steuerung über das Fahrzeug wieder zu übernehmen. Diese Nebenaufgabe wurde verglichen mit einer vollständig manuellen Fahrt, in der dem Fahrer an der Stelle der Übernahmeaufforderung ein Warnton ausgegeben wurde, mit einer automatisierten Fahrt mit einer anderen Aufgabe auf einem Tablet-PC sowie mit einer vom Fahrer überwachten automatisierten Fahrt. Es zeigte sich, dass 90% der Fahrer nach einer Fahrt mit hoher Ablenkung nach 3-4 Sekunden das erste Mal den Blick wieder auf die Straße gerichtet haben, nach 6-7 Sekunden die Hände wieder am Lenkrad und die Füße an den Pedalen haben und nach 7-8 Sekunden die Automation abschalten. Untersucht man allerdings als Indikatoren des Situationsbewusstseins für die Fahrsituation den ersten Blick in den Spiegel und den Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige, werden 12-15 Sekunden benötigt. Diese Reaktionen, die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig sind, sind damit um bis zu 5 Sekunden verzögert im Vergleich zu der gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt. Bei einzelnen Fahrern traten nach der Übernahme von der Automation Kollisionen oder kritische Fahrsituationen auf, was allerdings auch in der rein manuellen Fahrt in ähnlichem Umfang der Fall war. Diese Situationen hätten durch entsprechende Assistenzfunktionen verhindert werden können, die auch nach der Übergabe der Steuerung an den Fahrer aktiv bleiben und den Fahrer gerade in dieser Situation weiter besonders unterstützen. Weitere Reaktionszeiten und Fahrdaten wurden analysiert um ein vollständigeres Bild von dem Ablauf der Übernahme situation zu erhalten. Veränderungen der Reaktionszeiten in realen Fahrten im Vergleich zu einer Fahrt im Simulator sind nicht auszuschließen. Noch offen ist außerdem, ob für Fahrer längere automatisierte Fahrten, Müdigkeit, oder noch stärker involvierende Nebentätigkeiten während der automatisierten Fahrt längere Übernahme- und Reaktionszeiten zur Folge gehabt hätten. Einige dieser offenen Fragen sollen als nächstes in einer geplanten Fahrsimulations-Studie adressiert werden. Soll aus der Einführung von Automation im Fahrzeug nicht nur ein Gewinn an Komfort, sondern auch ein Gewinn an Sicherheit im Vergleich zum manuellen Fahren entstehen, so muss der Fahrer in Übernahme situationen nicht nur durch eine ausreichende Vorwarnzeit unterstützt werden. Vielmehr sollte der Fahrer gerade in der Situation nach der Übernahme durch Sicherheitsfunktionen assistiert werden.

Abstract

Many automotive OEMs are currently developing automated driving functions that no longer require driver supervision in certain driving environments. If system boundaries are reached the driver has to retake manual control. The system needs to provide a sufficient period of time in which the driver can safely and comfortably regain control over the vehicle. To determine a period of time for such a transition, relevant concepts from the field of automation psychology were presented and applied to the automotive context. Additionally an analysis of existent studies concerning take-over transition times from highly automated driving to manual driving was carried out to gain first insights into the time required for this transition. Building on the analysis of the literature and based on interviews that were conducted with automotive OEMs and suppliers, complex take-over scenarios and secondary tasks were developed which represent realistic and relevant conditions for future automated cars. These scenarios and secondary tasks were implemented in a static driving simulator and tested with $N = 60$ test drivers aged 20 to 76 ($M = 36.0$, $SD = 15.2$) years. After an automated drive of approx. 5 minutes, during which the drivers were distracted by motivating game on a handheld tablet-pc, the drivers were generally able to regain manual control over the vehicle. This secondary task was compared to a manual drive, in which the take-over request was substituted by an auditory warning, to an automated drive, in which a different task was presented on a tablet-pc, as well as to an automated drive, in which the participants supervised the automation. It could be shown, that after a highly distracted drive 90% of the participants first had their eyes on the road after 3-4 seconds, had their hands on the steering wheel and their feet on the pedals after 6-7 seconds and disengaged the automation after 7-8 seconds. When analyzing the times taken to look at the side mirror and the speedometer as indicators of situation awareness during this driving situation, 12-15 seconds are needed. These reactions, which are necessary for the comprehension of the traffic situation, are therefore up to 5 seconds slower for the distracted automated driving compared to manual driving. For some automated drives collisions and critical situations were recorded, although they were comparably frequent in the manual drive condition. These critical situations might have been avoided through the use of suitable driver assistance systems that stay active and support the driver after the driver has disengaged the automation. Additional reaction times and driving data was analyzed to gain further insights into the process of the take-over transition process. Driving in a real world scenario may change the reaction times compared to driving in a simulator. Also, the effects of longer automated drives, sleepiness and more immersive secondary tasks on take-over process and reaction times are not yet clear. Some of these issues will be addressed in a planned simulator study. If there is to be a gain not only in comfort but in safety for automated driving compared to manual driving, drivers need to be not only sufficiently forewarned before take-over situations, but must additionally be supported by suitable assistance systems before, during and after the transition to manual driving.

1. Hintergrund und Ziele des Projekts

Vor wenigen Jahren war es noch eine Zukunftsvision. Inzwischen sind sie klar im Fokus der Forschung und Entwicklung: Automatisierte Fahrzeuge, in denen der Fahrer die Fahrt nicht mehr dauerhaft überwachen muss. Prototypen und Entwürfe der Fahrzeughersteller verdeutlichen einen Prozess, der die Art und Weise, wie Menschen ihre Zeit während der Fahrt gestalten, nachhaltig verändern könnte. Beispielhaft für diesen Prozess sind die Konzeptfahrzeuge Xchange^{E1} und Budii² des Automobil-Zulieferers Rinspeed, die 2014 und 2015 im Rahmen des Genfer Autosalons vorgestellt wurden, sowie der Mercedes Benz F 015³, der 2015 auf der Consumer Electronics Show (CES) in Las Vegas präsentiert wurde. Gemeinsam ist diesen Fahrzeugen, dass das Design nicht mehr auf eine dauerhafte Kontrolle der Fahraufgabe ausgerichtet ist. Die Innenräume sind bereits zu gleichen Teilen auf die Nutzung der gewonnenen Zeit während einer autonomen Fahrt sowie auf die gelegentliche Übernahme der manuellen Steuerung des Fahrzeugs ausgelegt.

Fahrerassistenzsysteme, die einen hohen Grad an Automation erreichen, werden bereits seit einiger Zeit von vielen Herstellern angekündigt und aktiv entwickelt. Ein Stauassistent wurde sowohl von BMW als auch von Daimler bereits im Jahr 2014 in die Produktpalette aufgenommen. Ein Stauassistent ermöglicht die automatische Längs- und Querführung des Fahrzeugs bei niedrigen Geschwindigkeiten, setzt jedoch voraus, dass der Fahrer die Hände am Lenkrad belässt, und dem Fahrzeug nach einem vollständigen Stopp die Erlaubnis zur Weiterfahrt erteilt. Stauassistenten sind außerdem von Audi, Ford und Volvo für die Modelljahre ab 2015 angekündigt (vgl. Marinik et al., 2014). Automation bei höheren Geschwindigkeiten wird unter anderem von General Motors als „Super Cruise“ in Pressemitteilungen für das Jahr 2017 angestrebt. BMW und Daimler veröffentlichten unlängst Erfahrungsberichte zu hochautomatisierten Testfahrten auf deutschen Straßen (Aeberhard et al., 2015; Ziegler et al., 2014). Weitere Hersteller statten Ihre Fahrzeuge schon aktuell mit Assistenzsystemen für die automatische Längsführung (Adaptive Cruise Control), sowie die Querführung (Lane Keeping Assist System) aus und ermöglichen durch den gleichzeitigen Betrieb dieser Systeme effektiv eine vollständig automatisierte Fahrt auch bei hohen Geschwindigkeiten (zum Beispiel Audi, BMW, Honda, Infiniti; vgl. Trimble et al., 2014).

Während solche Konzepte technisch möglich werden, müssen gleichzeitig eine Vielzahl von Herausforderungen in der fortschreitenden Automatisierung von Fahrfunktionen gemeistert werden. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Gestaltung der Interaktion zwischen dem Fahrer und dem automatisierten Fahrzeug. Die Einführung von automatisierten Funktionen im Fahrzeug geschieht nicht als ein großer, sondern in vielen kleinen Schritten, die sich letztlich in der zunehmenden Fähigkeit des Fahrzeugs manifestieren, eine steigende Zahl von Fahrsituationen kontrollieren zu können. Eine zunehmende Automatisierung bedeutet hierbei aber auch die bleibende Rolle des Fahrers als Rückfallebene für Situationen, die eben von der Automation noch nicht abgedeckt sind. Solange die Möglichkeit besteht, dass es an einem Punkt der Fahrt zu einer Übergabe der Kontrolle von dem automatisierten Fahrzeug an den Fahrer kommt, ist die Gestaltung dieser Interaktion essentiell für die Sicherheit und den Komfort des Fahrers und aller Verkehrsteilnehmer.

¹ http://www.rinspeed.eu/conceptcar_Rinspeed-XchangemEem_25.html

² http://www.rinspeed.eu/info_Rinspeed-Budii_27.html

³ <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/innovation/research-vehicle-f-015-luxury-in-motion/>

Die nächste Entwicklungsstufe auf dem Weg zum automatisierten Fahrzeug ist die hochautomatisierte Fahrt. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) definiert diesen Grad der Automatisierung als die Übernahme der Quer- und Längsführung des Fahrzeugs durch die Automation für eine bestimmte Zeit, wobei der Fahrer das System nicht mehr überwachen muss und das System dem Fahrer im Falle einer Übernahme eine „ausreichende Zeitreserve“ zur Verfügung stellt (Gasser et al., 2012). Gleichzeitig hat die Automation nach dieser Definition die Fähigkeit, alle Systemgrenzen zu erkennen, ist jedoch nicht uneingeschränkt in der Lage, entsprechend aus jeder Situation einen risikominimalen Zustand herbeizuführen. Soll dieser Definition folgend eine sichere und komfortable Interaktion des Fahrers mit dem System gewährleistet werden, ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen hinsichtlich der Gestaltung der Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer Phase der hochautomatisierten Fahrt. Besonders die Zeit, die das Fahrzeug dem Fahrer ab dem Erkennen der Systemgrenze für die Übernahme zur Verfügung stellen kann, beeinflusst entscheidend die Sicherheit und den Komfort des Fahrers.

Wie lange braucht der Fahrer, um nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt die vollständige motorische und kognitive Kontrolle zurück zu gewinnen, und die Kontrolle in eine sinnvolle Handlung umzusetzen? Im Rahmen des Projekts sollten Zeiten für die Übernahme der Fahraufgabe in Abhängigkeit von der Komplexität der Fahrsituation und in Abhängigkeit von der Komplexität der Nebenaufgabe ermittelt werden. Dieser Projektbericht stellt zunächst die Ergebnisse einer Literaturrecherche zu der Kooperation von Mensch und Automation in verschiedenen Anwendungsfeldern dar und beschreibt anschließend eine empirische Studie zu Übernahmezeit und Übernahmequalität im Fahrzeug.

In dem ersten Teil wird zunächst ein Überblick zu den relevanten Themen der Forschung zur Interaktion zwischen Mensch und Automation gegeben. Hierbei werden wichtige Konstrukte der Automationspsychologie, die Stufen der Automation, sowie die menschliche Leistung bei der Überwachung und Kontrolle von automatisierten Systemen behandelt. Ein Fokus der Literaturrecherche liegt auf dem Wechsel von automatisierter Steuerung zu manueller Steuerung in komplexen Systemen. Die Analogiebildung zwischen der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen und automatisierten Systemen in Bereichen wie zum Beispiel Flugführung und Anlagensteuerung wird kritisch betrachtet und relevante Konzepte für die Bewertung der Qualität des Wechsels von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung heraus gearbeitet. Bisher veröffentlichte Studien zu diesem Thema werden vorgestellt und diskutiert. Aus der Betrachtung der Studien wird die Motivation und Notwendigkeit für die empirische Studie entwickelt, sowie eine passende Methodik abgeleitet. In dem empirischen Teil dieses Berichts wird schließlich die Simulator-Studie zu Übernahmezeit und Übernahmequalität aus einer hochautomatisierten Fahrt zu einer manuellen Steuerung vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Aus den Erkenntnissen aus Literatur und Studie werden dann Empfehlungen für eine sichere und komfortable Übernahmezeit aus einer hochautomatisierten Fahrt abgeleitet.

2. Mensch-Maschine Interaktion in automatisierten Systemen

2.1. Einleitung

Nach einer sehr allgemeinen Definition liegt Automation dann vor, wenn eine Maschine eine Aufgabe oder eine ganze Tätigkeit vollständig ausführt, die vorher vom Menschen ausgeführt wurde (Hauß & Timpe, 2000). Dieser Definition folgend würde der Faktor Mensch in automatisierten Systemen – außer bei der Gestaltung dieser Systeme – keine Rolle mehr spielen, wenn die automatisierte Aufgabe oder Tätigkeit losgelöst von einer menschlichen Arbeitsumgebung betrachtet werden könnte. Da Automation aber menschliche (Teil-) Aufgaben ersetzen soll, agiert sie meistens auch kooperativ mit Menschen.

Moray, Inagaki & Itoh (2000) definieren Automation als „any sensing, detection, information processing, decision making, or control action that could be performed by humans but is actually performed by machine“ (S. 44). In dieser detaillierteren Definition wird deutlich, dass eine Automation den Menschen selten komplett ersetzt, sondern auf den Ebenen der Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und Handlungsausführung zu unterstützen versucht. Aus dieser teilweisen Unterstützung ergibt sich der Fokus auf den Faktor Mensch in der Kooperation mit automatisierten Systemen: Eine gut funktionierende Automation ist auf die Fähigkeiten des menschlichen Kooperationspartners ausgerichtet. Schwächen und Fehler in der Gestaltung der Automation können zu einem unangemessenen Level von Unterstützung führen, aus dem sich negative Effekte ergeben. Diese können den Nutzen der Automation verringern oder sogar umkehren. Bainbridge (1983) beschreibt die negativen Konsequenzen solcher Systeme als „Ironien der Automation“.

2.2. Konzepte der Automationspsychologie

Automationspsychologische Fragestellungen finden sich vor allem in den Bereichen der Luftfahrt, der Anlagensteuerung, der Chemie- und Energieindustrie, sowie bei einer Vielzahl von Assistenzsystemen in der Chirurgie und Luftraumüberwachung, aber auch im Fahrzeug. Alle diese Bereiche haben aufgrund ihrer hohen Komplexität ein enormes Potential für eine Verbesserung der Genauigkeit und Sicherheit durch die Einführung von Automation. Ebenso hoch ist hier aber auch das Potential für Fehler, die aus der Zusammenarbeit von Mensch und Automation entstehen können, sowie das Gefahrenpotential, das sich aus solchen Fehlern ergibt.

2.2.1. Ironies of Automation/Clumsy Automation

Bainbridge (1983) beschreibt zwei Ironien, die aus der Annahme entstehen, dass Menschen unzuverlässig und ineffizient sind, und daher aus einem System entfernt werden sollten:

“[...] designer errors can be a major source of operating problems.“ (S. 775)

“[...] the designer who tries to eliminate the operator still leaves the operator to do the tasks which the designer cannot think how to automate.“ (S. 775)

Der Mensch, der mit einer Automation zusammenarbeitet, steht also letztlich vor dem doppelten Problem ein potentiell fehlerhaftes System zu überwachen, während er gleichzeitig eine Reihe von schwierigen Aufgaben weiterhin selber bearbeiten muss, die von der Automation nicht abgedeckt werden. Im schlimmsten Fall kann eine Automation somit nicht nur die Reduktion der mentalen und motorischen Beanspruchung aufheben, die das

Ziel der Automation waren, sondern auch zu neuen Problemen führen, die sich aus der mangelhaften Überwachung der automatisierten Prozesse ergeben.

Wiener (1989) nennt eine solche Automation „clumsy automation“ (dt. etwa „unbeholfene Automation“), da für die mentale Beanspruchung des Menschen lediglich eine Umverteilung durch den Einsatz einer Automation stattfindet, nicht aber eine tatsächliche Reduktion. Das lässt sich sehr deutlich am Beispiel der Automation in einem Kraftwerk nachvollziehen: Über lange Phasen braucht der Mensch hier nicht einzugreifen. Das System funktioniert automatisch und der Mensch sucht lediglich nach Abweichungen und Fehlern. Während dieser Phasen ist die Beanspruchung für den Menschen sehr gering, eventuell zu gering, sodass die Fähigkeit zur Entdeckung von Fehlern nachlässt. Tritt nun ein Fehler auf, übergibt das System die Steuerung zurück an den Menschen. Aus einer zu geringen Beanspruchung wird plötzlich eine zu hohe Beanspruchung. Aus einer Situation, in der durch die geringe Signalrate Vigilanz-Probleme auftreten können, wird innerhalb kurzer Zeit eine Situation mit einer sehr hohen Signalrate, in der die mentalen Ressourcen des Menschen an ihre Grenzen stoßen. Hancock (2015) formuliert dieses Problem bezogen auf die Automation von Fahrzeugen polemisch neu: „If you build vehicles where drivers are rarely required to respond, then they will rarely respond when required“ (Hancock, 2015, S. 138).

Die Rolle des Menschen in einem automatisierten System lässt sich zusammenfassen als überwachende Kontrolle, oder „Supervisory Control“ (Sheridan, 1987). Die Verantwortung für die Überwachung der Automation liegt hier beim Menschen, der bei Fehlern auch korrigierend eingreifen muss.

2.2.2. Supervisory Control

Nach Sarter, Woods & Billings (1997) verfolgt Automatisierung das Ziel, die Präzision und Ökonomie eines Vorgangs zu verbessern und gleichzeitig die Beanspruchung und die Trainingsanforderungen für den Menschen zu verringern. Die Autoren stellen fest, dass zwar der erste Teil dieses Ziels häufig erreicht wird, Verbesserungen auf der menschlichen Seite aber selten das gewünschte Niveau erreichen. Viele der Probleme, die bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation entstehen, liegen in der veränderten Rolle des Menschen als „Supervisor“, als Überwacher über die Automation, begründet. Sheridan (1987) beschreibt, wie in einem automatisierten System die aktive Ausführung von Handlungen an die Maschine delegiert und der Mensch als Regler eines Prozesses durch die Automation ersetzt wird. Hierdurch bleibt für den Menschen nur eine passive Rolle, in der er Prozesse überwacht, in Ausnahme- und Notfallsituationen eingreift und die Ressourcen der Automation organisiert. Sheridan & Parasuraman (2006) definieren die Aufgaben des Menschen in einem solchen System als *planning*, *teaching*, *monitoring*, *intervening* und *learning*. Der Mensch plant die Automation, bringt der Automation ihre Aufgaben bei, überwacht dann die Automation und greift ein, wenn Fehlfunktionen oder Systemgrenzen auftreten. Während dieses Prozesses lernt der Mensch außerdem den Umgang mit der Automation und entwickelt bestimmte Erwartungen an deren Fähigkeiten und Fehlerhäufigkeiten. Der Mensch ist hierbei häufig „out-of-the-loop“, das heißt, er hat nicht zu jedem Zeitpunkt des Prozesses ein korrektes mentales Modell der Funktionen, die von der Automation kontrolliert und ausgeführt werden (Endsley & Kiris, 1995).

Aus den Charakteristika der Aufgabe der Supervisory Control und dem out-of-the-loop Phänomen, lassen sich eine Reihe von Problemfeldern ableiten, die bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation zu Fehlern führen können. Entscheidend für die Beschreibung der Probleme, die bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation

entstehen können, ist das psychologische Konzept des Situationsbewusstseins. Spezifischere Konzepte aus dem Bereich der Automationspsychologie wie das Bewusstsein für den aktuellen Modus einer Automation, der Automations-Bias, sowie das Vertrauen in Automation, die sich aus den allgemeineren psychologischen Konzepten ableiten, spielen ebenfalls eine Rolle.

2.2.3. Situationsbewusstsein

Endsley (1988) definiert das Situationsbewusstsein als

„[...] the perception of elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future.“ (S. 97)

Es werden also drei Stufen des Situationsbewusstseins postuliert, die sich bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation beobachten lassen. Zunächst müssen kritische Faktoren der Umgebung wahrgenommen werden (Stufe 1), diese Faktoren müssen dann verstanden und in Bezug zu den eigenen Zielen gesetzt werden (Stufe 2). Auf der höchsten Stufe müssen die Informationen aus den unteren zwei Stufen integriert und für eine Vorhersage der Entwicklung der Situation verwendet werden (Stufe 3; Endsley, 1996).

Für das Verständnis von Menschen in automatisierten Systemen ist das Situationsbewusstsein ein entscheidendes Konstrukt, da es direkt mit Veränderungen in der Vigilanz und Complacency (siehe Abschnitt 2.2.6) bei der Überwachung von Automation zusammenhängt. Der Mensch nimmt bei der Überwachung von Automation eine passive Rolle ein, die zu einer Verschlechterung des Situationsbewusstseins führt. Verstärkt wird diese Passivität noch durch fehlendes oder qualitativ anderes Feedback über die Situation, im Vergleich zu einer manuellen Steuerung des Systems (Endsley & Kiris, 1995). Ein schlechteres Situationsbewusstsein führt somit unmittelbar zu einer schlechteren Leistung bei der Entdeckung von Fehlern in automatisierten Systemen, sowie zu einer Verschlechterung der Leistung, wenn überraschende manuelle Eingriffe in ein solches System notwendig sind (vgl. Sarter, Woods & Billings, 1997; „Automation surprises“). Wird ein manuelles Eingreifen durch den menschlichen Überwacher der Automation notwendig, sollte das mentale Modell der Funktionsweise der Automation so gut wie möglich mit der tatsächlichen Funktionsweise der Automation übereinstimmen. Endsley, Bolté & Jones (2003) verbinden Probleme bei der Überwachung von automatisierten Systemen mit Faktoren, die auf unterschiedlichen Ebenen des Situationsbewusstseins wirken. Auf Stufe 1 des Situationsbewusstseins treten Probleme demnach vor allem durch eine mangelhafte Überwachung des Systems, durch veränderte, oder fehlende Feedback-Kanäle des Systems, sowie durch eine mangelhafte Transparenz des Systems auf. Auf der 2. und 3. Stufe des Situationsbewusstseins kommt es hingegen hauptsächlich auf Grund einer zu hohen Komplexität des Systems zu Problemen (Endsley et al., 2003).

2.2.4. Automation Bias

Der Begriff *Automation Bias* bezieht sich auf die menschliche Neigung, Fehler zu begehen, wenn bei Entscheidungen Hinweise durch eine Automation als Ersatz für eine eigene Suche nach Hinweisen verwendet werden. Die Automation wird als Heuristik für die Situation vorgezogen (Mosier et al., 1996). Hierbei können sowohl *Commission-Fehler*, als auch *Omission-Fehler* auftreten. *Commission-Fehler* beschreiben das Befolgen einer automatisierten Anweisung ohne eigene Suche nach widersprüchlichen Informationen, bzw. sogar entgegen gefundenen widersprüchlichen Informationen. Diese Art von Fehlern

entsteht aus einer Vernachlässigung der Informationssuche, sowie aus einem übersteigerten Vertrauen in die Fähigkeiten der Automation. *Omission*-Fehler beschreiben hingegen das Befolgen der Automation im Sinne eines Wartens auf Warnungen und Hinweise, bei gleichzeitiger nicht-Beachtung relevanter Hinweise aus der Umgebung. Bei dieser Art von Fehlern scheint hauptsächlich das Nachlassen der Vigilanz bei der Überwachung einer Automation eine Rolle zu spielen (Skitka, Mosier & Burdick, 2000).

Dokumentiert wurde der Automation Bias unter anderem im Flugzeug-Cockpit, das durch eine hohe Komplexität, sowie eine hohe Verfügbarkeit von Automation gekennzeichnet ist. Mosier et al. (1998) fanden, dass Piloten bei der Zusammenarbeit mit automatisierten Entscheidungssystemen nicht alle verfügbaren Informationen nutzten. Eine Verringerung dieses Effekts konnte hierbei durch das Vorhandensein eines Gefühls der Zuständigkeit bei den Piloten festgestellt werden. Ein enger Zusammenhang besteht außerdem zwischen dem Automation Bias und dem Vertrauen in die Fähigkeiten einer Automation (vgl. Bahner, 2008).

2.2.5. Vertrauen in Automation

Lee & See (2004) beschreiben, wie *Misuse* und *Disuse* von automatisierten Systemen durch die Kalibrierung von angemessenem Vertrauen verhindert werden kann. *Misuse* wird von Parasuraman & Riley (1997) definiert als das Auftreten von Fehlern durch eine unangemessen hohe Abhängigkeit von den Fähigkeiten einer Automation, während *Disuse* als Fehler durch die Weigerung der Nutzung von automatisierten Systemen beschrieben wird. Lee & See (2004) unterscheiden zwischen dem sozialpsychologischen Konzept *Trust* (dt. Vertrauen) und der *Reliance* (dt. Verlass; Vertrauen; Abhängigkeit). *Trust* definieren die Autoren als Einstellung bezogen auf einen Mensch oder eine Maschine, der, oder die einem Individuum dabei hilft seine Ziele in einer Situation zu erreichen, die durch Unsicherheit und Vulnerabilität gekennzeichnet ist (vgl. Lee & See, 2004, S. 54). Als *Reliance* wird die beobachtbare Auswirkung von Vertrauen auf das Verhalten bei der Nutzung von komplexen automatisierten Systemen bezeichnet, wobei Vertrauen *Reliance* beeinflusst, aber nicht vollständig determiniert. „Trust in automation guides reliance when the complexity of the automation makes a complete understanding impractical and when the situation demands adaptive behavior that procedures cannot guide“ (Lee & See, 2004, S. 52).

Die Passung des Vertrauens zu den tatsächlichen Fähigkeiten einer Automation ist also eine wichtige Herausforderung auf dem Weg zu einer sicheren Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Einflussmöglichkeiten auf das Vertrauen in eine Automation ergeben sich aus der wechselseitigen Beeinflussung von Vertrauen und *Reliance*, aus dem gegebenen Kontext, in dem mit der Automation interagiert wird, sowie aus der Art der Informationsdarstellung, die den Zustand und die Fähigkeiten der Automation an den menschlichen Nutzer zurückmeldet (Lee & See, 2004). Versuche, das Vertrauen in eine Automation über die Gestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine angemessen zu kalibrieren, finden sich unter anderem im Automobilbereich bei Beller, Heesen und Vollrath, (2013), Seppelt und Lee (2007), sowie in Verberne, Ham und Midden (2012). Die Autoren konnten zeigen, dass über die Gestaltung der Informationen, die ein Assistenzsystem im Fahrzeug zur Verfügung stellt, das Vertrauen in die Automation angemessener kalibriert wird und entsprechend eine angemessenere Nutzung der Systeme durch den Fahrer bewirkt werden kann.

Ist das Niveau des Vertrauens nicht angemessen zu den Fähigkeiten einer Automation kalibriert, kann es zu einem übersteigerten Vertrauen kommen, und damit zu einem Auftreten der Automationsphänomene *Complacency* und *Overreliance*.

2.2.6. Complacency/Overreliance

Complacency (dt. Selbstzufriedenheit) wird von Weiner (1981) sehr allgemein definiert als „a psychological state characterized by a low index of suspicion“ (S. 117). In dieser Definition wird bereits eine Kernkomponente deutlich: die Abwesenheit von Misstrauen gegenüber einer Situation. Billings et al. (1976) beziehen in ihrer Definition eine weitere wichtige Komponente mit ein: „[...] self-satisfaction which may result in non-vigilance based on an unjustified assumption of satisfactory system state“ (S. 23). Für die Entwicklung von Complacency muss also zusätzlich gegeben sein, dass die Abwesenheit von Misstrauen in ein System ungerechtfertigt ist und dass grundsätzlich von einem fehlerfreien Systemzustand ausgegangen wird. Zusätzlich wird in dieser Definition die Folge von Complacency deutlich: Die dauerhafte Überwachung eines Systems wird vernachlässigt und die benötigte Aufmerksamkeit zur Entdeckung von Fehlern lässt sich nicht aufrechterhalten. Dieser psychologische Zustand wurde zunächst primär durch die zunehmende Automatisierung in Flugzeug-Cockpits in den Fokus der Forschung gerückt, wobei Piloten in solchen automatisierten Flugzeugen eine hohe Anfälligkeit für Complacency nachgewiesen werden konnte. Einige Unfälle in diesem Bereich konnten zumindest teilweise auf entsprechendes Verhalten zurückgeführt werden (Wiener, 1981).

Analog zu dem allgemeinen Vertrauen in Automation bezeichnet Overreliance das aus dem psychologischen Zustand Complacency entstehende Verhalten. Verhaltensmanifestationen von Complacency sind zum Beispiel das unzureichende Überwachen von Kennwerten einer Automation oder Fehlentscheidungen auf Grundlage von unzureichenden Daten (Parasuraman & Riley, 1997). Bahner, Hüper und Manzey (2008) konnten zeigen, dass Complacency grundsätzlich zu einer unzureichenden Verifikation von simulierten Daten führte, woraus sich besonders bei hohen Levels von Complacency die Tendenz zu Commission-Fehlern ergab.

Systematisch beeinflussende Faktoren für die Entwicklung von Complacency scheinen insbesondere das Vertrauen in eine Automation, das Konfidenzniveau, das einer Automation zugesprochen wird, sowie das Verlassen auf die Fähigkeiten einer Automation zu sein (Singh, Molloy & Parasuraman, 1993). Diese Faktoren sind wiederum beeinflusst durch die Art und Häufigkeit des Auftretens von Automations-Fehlern. Parasuraman, Molloy und Singh (1993) fanden, dass unter Multitasking-Bedingungen eine höhere Variabilität in der Art und der Häufigkeit des Auftretens der Automations-Fehler zu einer besseren Überwachung der Automation und somit zu einer geringeren Complacency führten. Insgesamt scheinen Complacency-Effekte nur unter Multitasking-Bedingungen aufzutreten und können durch Training zwar verringert, aber in der Zusammenarbeit zwischen automatisierten Systemen und Menschen nicht vollständig verhindert werden (Parasuraman & Manzey, 2010).

2.3. Stufen der Automatisierung

Eine frühe Einteilung von Stufen der Automatisierung wurde von Sheridan und Verplanck bereits im Jahr 1978 vorgenommen. Die Autoren ordnen ihre zehn Stufen der Automatisierung ausgehend von Stufe 1, in der der Mensch alle Aufgaben übernimmt, bis zu Stufe 10, auf der der Computer alle Aufgaben übernimmt. Die Stufen der Automatisierung nach Sheridan und Verplanck (1978) sind in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt. Solche diskreten Stufen mit entsprechenden Definitionen können bei der Einordnung von automatisierten Systemen helfen und Systemdesignern Orientierungshilfen für die Verteilung der Aufgaben in teilautomatisierten Systemen bieten.

Spätere Definitionen von Automatisierungsstufen greifen häufig die grundlegende Einteilung von Sheridan & Verplanck (1978) auf, fassen dabei aber mehrere Stufen des ursprünglichen Modells zu einer Stufe zusammen. Endsley (1988) beschreibt fünf Stufen der Automatisierung in komplexen Mensch-Maschine Systemen: 1. *Manual control* 2. *Decision support* 3. *Consensual artificial intelligence* 4. *Monitored artificial intelligence* 5. *Full automation with no operator interaction*. In ihrem *Model for types and levels of automation* wählen Parasuraman, Sheridan und Wickens (2000) wieder eine an Sheridan und Verplanck (1978) angelehnte zehnstufige Einteilung, und verbinden diese Stufen mit einem vierstufigen Modell der menschlichen Informationsverarbeitung: Informationsaufnahme, Informationsanalyse, Entscheidungsauswahl, Handlungsausführung. Das Modell erlaubt eine vergleichende Einstufung verschiedener automatisierter Systeme hinsichtlich der Art und des Grades der Unterstützung, die das System dem Menschen anbieten kann.

Praktische Implikationen für die Gestaltung und die Evaluation von automatisierten Systemen ergeben sich aus den Stufen der Automatisierung für die erwarteten Automationseffekte sowie die menschliche Leistung in der Kooperation mit solchen Systemen. Onnasch et al. (2014) untersuchen in einer Meta-Analyse die Abhängigkeit der menschlichen Leistung von unterschiedlichen Abstufungen der Automatisierung. Die Autoren schließen, dass routiniert ausgeführt Aufgaben unter der Voraussetzung einer gut funktionierenden Automation deutlich von einem höheren Grad der Automatisierung profitieren. Hingegen scheinen höhere Stufen der Automatisierung, besonders bei fehlerhafter Automation, zu einer Verschlechterung der menschlichen Leistung zu führen. Dies gilt insbesondere bezogen auf die Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins. Als kritisch identifizierten Onnasch et al. (2014) vor allem den Übergang zwischen einem automatisierten System, das nur die Informations-Analyse unterstützt, und einem System, das auch auf der Ebene der Handlungsauswahl unterstützt. Automation, die auch die Auswahl von angemessenen Handlungen unterstützt, scheint besonders anfällig für negative Automationseffekte und eine Verminderung der Leistung des menschlichen Kooperationspartners zu sein.

Im Automobilbereich sind im Zuge der fortschreitenden Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen eine Reihe von Definitionen für die einzelnen Stufen der Automatisierung etabliert worden, die bei der Einordnung von vorhandenen Systemen sowie bei der Entwicklung und Regulation von neuen Systemen hilfreich sind. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat im Jahr 2012 eine fünfstufige Kategorisierung entwickelt, die von *Driver Only* bis *Vollautomatisiert* reicht (Gasser et al., 2012). Die Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen nach Gasser et al. (2012) ist in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Im englischsprachigen Raum haben sich für die Beschreibung der Automatisierungsgrade im Fahrzeug zwei Kategorisierungen durchgesetzt, die den Definitionen der BASt sehr ähnlich sind, in einigen Punkten jedoch abweichen. Die Society of Automotive Engineers (SAE) definiert sechs Grade der Fahrzeugautomatisierung: (0) *No Automation*, (1) *Driver Assistance*, (2) *Partial Automation*, (3) *Conditional Automation*, (4) *High Automation*, (5) *Full Automation* (SAE, 2013). Hierbei wird davon ausgegangen, dass in den Stufen 0 bis 2 ein menschlicher Fahrer die Fahrumgebung überwacht und ab der Stufe 3 die Automation die Fahrumgebung überwacht. Die Stufen 0 bis 4 der SAE stimmen mit den Stufen *Driver Only* bis *Vollautomatisiert* der BASt überein. Die Stufe 5 (*Full Automation*) geht über den Fokus der BASt-Definitionen hinaus, und postuliert ein System, das in jeder Situation fahren kann, die auch von einem menschlichen Fahrer bewältigt werden könnte.

Tabelle 1: Zehn Stufen der Automatisierung bei der Mensch-Computer Entscheidungsfindung und Handlungsauswahl für einen einzelnen Entscheidungsschritt. Modifiziert nach Sheridan und Verplanck (1978), S. 168.

Stufe der Automatisierung	Beschreibung der Interaktion
1	Der Computer bietet keine Unterstützung an: Der Mensch muss alle Entscheidungen treffen und alle Handlungen auswählen
2	Der Computer bietet eine vollständige Auswahl von Entscheidungs- und Handlungsalternativen an
3	Der Computer verringert die Auswahl von Entscheidungs- und Handlungsalternativen auf einige wenige
4	Der Computer schlägt eine Entscheidungs- oder Handlungsalternative vor
5	Der Computer trifft eine Entscheidung/führt eine Handlung aus, wenn der Mensch zustimmt
6	Der Computer behält dem Menschen mit einem gewissen Zeitpuffer ein Vetorecht vor, bevor er eine Entscheidung trifft/Handlung ausführt
7	Der Computer trifft eine Entscheidung/führt eine Handlung automatisch aus, informiert dann aber in jedem Fall den Menschen über die getroffene Entscheidung/ausgeführte Handlung
8	Der Computer trifft eine Entscheidung/führt eine Handlung automatisch aus, und informiert den Menschen nur, wenn dieser explizit danach fragt
9	Der Computer trifft eine Entscheidung/führt eine Handlung automatisch aus. Der Mensch wird darüber nur informiert, wenn der Computer es entscheidet.
10	Der Computer entscheidet alles und handelt autonom. Der Mensch wird hierbei ignoriert.

Eine weitere Kategorisierung wurde von der US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) im Jahr 2013 veröffentlicht. Die Kategorisierung der Automationsgrade der NHTSA beinhaltet die Stufen (0) *No Automation*, (1) *Function-specific Automation*, (2) *Combined Function Automation*, (3) *Limited Self-Driving Automation* und (4) *Full Self-Driving Automation* (NHTSA, 2013). Die Stufe 0 bis 3 stimmt inhaltlich weitgehend mit den Definitionen der BAST überein. Die Stufen 3 und 4 gehen jedoch analog zu den Definitionen der SAE teilweise über den Fokus der BAST-Definitionen hinaus, wobei die Stufe 4 der NHTSA Elemente sowohl aus der Stufe 4, als auch aus der Stufe 5 nach der Definition der SAE enthält.

Besonders im Bereich der Fahrzeugautomatisierung hat der Automatisierungsgrad, der von den Entwicklern eines Systems festgelegt wurde, einen Einfluss auf die Erwartungen der menschlichen Kooperationspartner der Automation und damit auf das Verhalten in der Interaktion mit der Automation. Kircher, Larsson und Hultgren (2014) fanden in einer

Fahrsimulationsstudie Indizien, dass der Grad der Automatisierung im Fahrzeug besonders die taktische bzw. die Führungsebene des Fahrens beeinflusst. Je nach dem erwarteten Grad der Automatisierung entscheiden Fahrer für unterschiedliche Situationen jeweils spezifisch, ob sie die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen oder eine Reaktion der Automation auf die Fahrsituation abwarten. Hierbei führen höhere Grade der Automatisierung grundsätzlich zu passiverem Verhalten der Fahrer.

Tabelle 2: Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen und Definition verschiedener Automatisierungsgrade. Modifiziert nach Gasser et al. (2012), S. 31.

Stufe der Automatisierung	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	Beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.	Kein in die Längs- oder Querführung eingreifendes (Fahrerassistenz-)System aktiv.
Assistiert	Fahrer führt dauerhaft <u>entweder</u> die Quer- <u>oder</u> die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. <ul style="list-style-type: none"> - Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. - Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	<i>Adaptive Cruise Control:</i> Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung <i>Parkassistent:</i> Querführung durch Parkassistent (Automatisches Lenken in Parklücken. Der Fahrer steuert die Längsführung.)
Teilautomatisiert	Das System übernimmt Quer- <u>und</u> Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und/ oder in spezifischen Situationen). <ul style="list-style-type: none"> - Der Fahrer muss das System <u>dauerhaft</u> überwachen. - Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	<i>Autobahnassistent:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderungen sofort reagieren
Hochautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. <ul style="list-style-type: none"> - Der Fahrer muss das System dabei <u>nicht</u> dauerhaft überwachen. - Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. - Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. (z.T. vom System abfangen, z.T. muss der Fahrer übernehmen). - Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen. 	<i>Autobahn-Chauffeur:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung mit gewisser Zeitreserve reagieren
Vollautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. <ul style="list-style-type: none"> - Der Fahrer muss das System dabei <u>nicht</u> überwachen. - Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf. - Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. - Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen. 	<i>Autobahn-pilot:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss nicht überwachen - Reagiert der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung, so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter

2.4. Menschliche Leistungsfähigkeit bei der Interaktion mit automatisierten Systemen

Die Interaktion zwischen Menschen und komplexen automatisierten Systemen führt zu einer Reihe von potentiellen Problemen, die sich häufig erst durch Fehler und daraus resultierende Unfälle manifestieren. Aus solchen Unfällen und Fallstudien sowie aus psychologischen Experimenten lassen sich Hinweise auf die Leistung von Menschen bei der Interaktion mit automatisierten Systemen ableiten. Sheridan und Nadler (2006) geben einen Literaturüberblick zu dokumentierten Automations-Unfällen und kategorisieren darauf aufbauend Problemfelder bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation:

- Funktions-Allokation (Welche Aufgaben werden automatisiert, welche Aufgaben werden dem Menschen überlassen?)
- Automatisierungsgrad (In welcher Situation ist wie viel Automatisierung angemessen?)
- Menschlicher Entscheidungs-Bias (Menschen neigen in bestimmten Situationen und bei bestimmten Informationslagen dazu irrationale Entscheidungen zu treffen.)
- Mentale Modelle (Das mentale Modell des Menschen von der Funktionsweise der Automation kann bei der Bedienung der Automation von dem ursprünglichen mentalen Modell des Entwicklers abweichen.)
- Vertrauen in die Automation (Falsch kalibriertes Vertrauen führt zu Overreliance und verschlechterter Leistung bei der Überwachung eines automatisierten Systems)

In all diesen Feldern können Eigenschaften des Menschen – Wahrnehmung, kognitive Leistungsfähigkeit, Wissen, Erfahrung, Einstellungen und Persönlichkeit – zu der Leistung bei der Überwachung und Interaktion von Automation beitragen oder sie behindern. Diese menschlichen Faktoren interagieren mit der Gestaltung der Automation. Die beeinflussenden Faktoren für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Automation sind in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt. Im Folgenden werden beispielhaft Studien vorgestellt, die den Zusammenhang der in Abbildung 1 dargestellten Faktoren verdeutlichen. Als “Leistung” bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation werden je nach System unterschiedliche Kriterien angelegt. Häufig verwendete Klassen von Metriken für die Operationalisierung der Leistung von Mensch-Automation Systemen sind nach Donmez, Pina und Cummings (2009):

- Effektivität bei dem Abschluss einer Aufgabe (z.B. Grad der Aufgabenbewältigung, Abschluss von (Teil-)Zielen)
- Effizienz des Automationsverhaltens (z.B. Gebrauchstauglichkeit, Reliabilität, Grad der Autonomie)
- Effizienz des menschlichen Verhaltens
 - o Aufmerksamkeits-Allokations-Effizienz (z.B. Blickverhalten, Priorisierung)
 - o Informationsverarbeitungs-Effizienz (z.B. Entscheidungsverhalten)
- Indikatoren menschlichen Verhaltens
 - o Kognitive Indikatoren (z.B. Situationsbewusstsein, mentale Beanspruchung)
 - o Physiologische Indikatoren (z.B. Müdigkeit, physischer Komfort)
- Kollaborative Metriken
 - o Mensch/Automation Kollaboration (z.B. Vertrauen, mentale Modelle)
 - o Mensch/Mensch Kollaboration (z.B. Koordinations-Effizienz, mentales Modell des Teams)
 - o Automation/Automation Kollaboration (z.B. Reaktionszeiten verschiedener Systeme auf die Veränderung der jeweils anderen Automation)

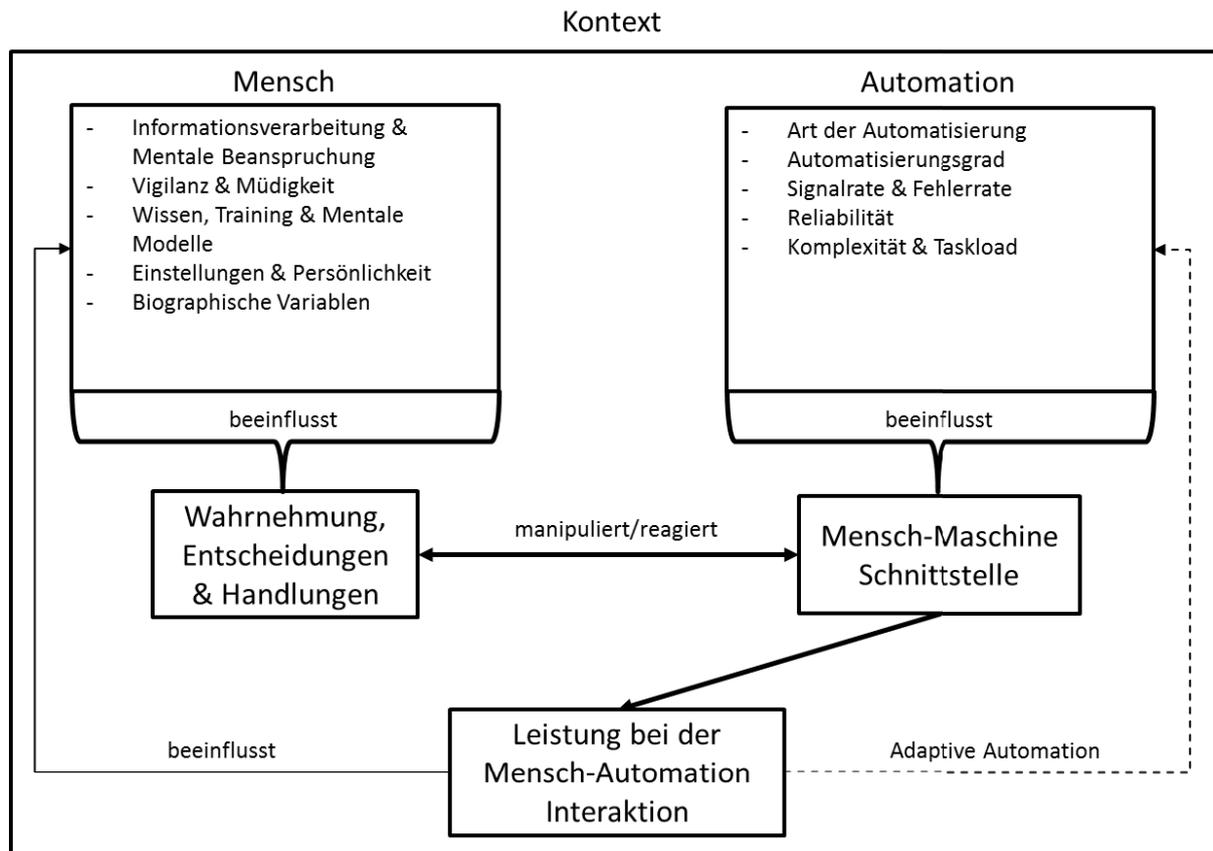


Abbildung 1: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Leistung bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation. Eigene Darstellung, aufbauend auf Wickens und Hollands (2000).

Bezogen auf das Beispiel der Bewertung der Leistung einer Kooperation zwischen einem automatisierten Fahrzeug und einem Fahrer, würden anhand dieser Klassen von Kriterien zum Beispiel der Erfolg eines Spurwechsels als Reaktion auf ein liegen gebliebenes Fahrzeug, das Blickverhalten des Fahrers während dieser Situation, das Bewusstsein des Fahrers für die umgebenden Fahrzeuge, sowie der Grad des Vertrauens in die Automation nach dem Spurwechsel erhoben werden. Verschiedene Indikatoren für die Leistung bei der Interaktion zwischen Fahrer und automatisiertem Fahrzeug können je nach Situation angemessen sein, und entsprechend kombiniert werden.

Ausschlaggebend für die Leistung auf der Seite des Menschen sind alle Faktoren, die die Wahrnehmung, die Entscheidungen und die Handlungen des Menschen während der Kooperation mit der Automation beeinflussen.

Wenn ein automatisiertes System eine dauerhafte Überwachung erfordert, muss die Aufrechterhaltung von dauerhafter Aufmerksamkeit gewährleistet sein. Diese Art der Daueraufmerksamkeit wird auch als *Vigilanz* bezeichnet (Grier et al., 2003). Vigilanz ist typischerweise gefordert, wenn es um die Überwachung von Anzeigen mit einer niedrigen Signalrate, aber gelegentlichem Auftreten von kritischen Ereignissen geht. Niedrige Signalraten werden von Parasuraman, Warm und Dember (1987) als das Auftreten von kritischen Signalen mit einer Häufigkeit von 2% bis 5% beschrieben, können aber in der praktischen Anwendung noch geringer ausfallen, und sind somit typisch für viele automatisierte Systeme. Vigilanz-Aufgaben sind nicht nur durch das Entstehen von Unterforderung und Langeweile anstrengend für einen Überwacher, sondern verlangen ein

aktives Aufrechterhalten von Aufmerksamkeit, das zu mentaler Beanspruchung und Stress führen kann (Warm, Parasuraman & Matthews, 2008). Die Fähigkeit zur Vigilanz sowie das Vorhandensein von längerfristigen Vigilanz-Aufgaben formt somit die Leistungsfähigkeit von Menschen in der Interaktion mit Automation entscheidend mit. Menschliche Überwacher einer Automation sind nur begrenzt in der Lage Aufmerksamkeit dauerhaft aufrecht zu erhalten, und können in Abhängigkeit von dem durch die Aufgabe induzierten Vigilanz-Dekrement deutlich verschlechterte Leistungen bei der Entdeckung von Fehlern in der Automation zeigen.

Ähnlich zu den beschriebenen Einflüssen der Vigilanz auf die Überwachung einer Automation hat auch die Müdigkeit des Menschen, der mit einer Automation in Interaktion tritt, einen entscheidenden Einfluss auf die Leistung bei der Mensch-Automation Interaktion. Dingus (1995) beschreibt die menschliche Neigung zu Fehlern in Abhängigkeit von Müdigkeit. Der Autor identifiziert Leistungsabfälle vor allem bei der Reaktion auf Reize, die verspätet oder gar nicht wahrgenommen werden, sowie bei der kognitiven Verarbeitung, die verlangsamt sein kann. Außerdem sind Verschlechterungen der Leistung des Kurzzeitgedächtnisses sowie eine Verstärkung von time-on-task Effekten zu beobachten, die zu einer starken Zunahme von Fehlern mit zunehmender Müdigkeit führen (Barger et al., 2006). Lo et al. (2012) konnten zeigen, dass akuter Schlafmangel besonders bei Aufgaben zu einem Abfall der Leistung führt, die dauerhafte Aufmerksamkeit erfordern, während Lim und Dingus (2010) negative Effekte durch Müdigkeit vor allem bei der Geschwindigkeit und Genauigkeit von bearbeiteten Aufgaben beobachteten. Diese und ähnliche Studien zeigen deutlich den Einfluss menschlicher Müdigkeit auf die Leistung bei der Überwachung von Systemen, sowie bei der Durchführung von Aufgaben in Kooperation mit Automation. Durch das Einschätzen der aktuellen Müdigkeit des menschlichen Kooperationspartners einer Automation können Vorhersagen über die Leistungsfähigkeit des Systems Mensch-Automation in bestimmten Situationen getroffen und Fehler vermieden werden. So zeigen zum Beispiel Reichenbach, Onnasch und Manzey (2011), dass der Grad der Automatisierung eines Systems variiert werden kann, um auch in Kooperation mit schlafdeprivierten Menschen eine gleichbleibende Leistung zu erzielen und dass Müdigkeit einen Einfluss auf die Art und Weise zu haben scheint, wie Menschen Automation nutzen.

Ein weiterer Faktor mit Einfluss auf die Interaktion zwischen Mensch und Automation ist das Wissen des Nutzers über die Fähigkeiten und Limitationen der Automation, das sich aus den Erfahrungen oder dem Training mit der Automation ergibt. Bahner, Hüper und Manzey (2008) konnten zeigen, dass sich durch ein Training, in dem Fehler des automatisierten Systems auftraten, negative Automationseffekte (insbesondere Complacency) verringern lassen. Einen positiven Effekt der Expertise mit einem automatisierten System fanden auch Schriver et al. (2008), wobei hier besonders Vorteile in der Geschwindigkeit und Genauigkeit deutlich wurden, mit der erfahrener Bediener auf der Grundlage von automatisierten Anzeigen Entscheidungen treffen. Geschulte Personen scheinen in einem automatisierten System ihre Aufmerksamkeit besser auf die jeweils für eine Situation relevanten Orte zu richten. Auch die Instruktion von Verantwortlichkeit für die aus der Interaktion mit der Automation entstehenden Konsequenzen scheint einen positiven Effekt auf die Leistung mit imperfekter Automation zu haben und vor allem Automation Bias zu reduzieren (Skitka, Mosier & Burdick, 2000).

Wie Sarter und Woods (1994) anhand der Interaktion von Piloten mit Cockpit-Automation zeigen konnten, beeinflusst die Passung der realen Funktionsweise einer Automation zu dem mentalen Modell des Benutzers besonders in zeitkritischen Situationen entscheidend

die Leistung bei der Entdeckung von Automations-Fehlern und geänderten Automations-Modi. Mentale Modelle, also interne Repräsentationen eines Individuums, die das Verhalten von Systemen beschreiben und vorhersagen, basieren auf den Erfahrungen, die eine Person mit einem System gemacht hat und dem Wissen, das eine Person über das System hat. Besonders wichtig für eine problemlose Interaktion zwischen Mensch und Automation ist, dass Systemgrenzen, an denen Automationsfehler auftreten können, adäquat in den mentalen Modellen des Benutzers repräsentiert sind (Stanton & Young, 1998).

Einstellungen, wie zum Beispiel Vertrauen in ein System (siehe Kapitel 2.2.5), können einen starken Einfluss auf die Nutzung des Systems haben, sowohl was die Entscheidung ein automatisiertes System überhaupt zu nutzen angeht, als auch hinsichtlich der Art und Weise wie ein solches System während der Nutzung überwacht wird (Lee & Moray, 1992). Nach Lee und See (2004) sollte Vertrauen in ein System richtig kalibriert werden, um sowohl Overreliance als auch Misstrauen vorzubeugen. Weitere Variablen innerhalb eines Nutzers, die einen Einfluss auf die Leistung bei der Interaktion mit Mensch-Automation Systemen zu haben scheinen, sind zum Beispiel die klassischen Big-Five-Persönlichkeitsfaktoren (Rose et al., 2002; Szalma & Taylor, 2011), oder das Complacency-Potenzial (Singh, Molloy & Parasuraman, 1993; Prinzel, Freeman & Prinzel, 2005). Hier kann bei der Auswahl der Nutzer von sicherheitskritischen Systemen angesetzt werden, um besonders geeignete Personen für die dauerhafte Überwachung automatisierter Systeme auszuwählen, und so eine bestmögliche Leistung des Systems Mensch-Automation zu gewährleisten.

Weitere individuelle, personenbezogene Einflüsse auf die Interaktion mit Automation ergeben sich beispielsweise aus dem Alter der Nutzer (McBride, Rogers & Fisk, 2010). In der Studie von McBride et al. (2010) wurde jüngeren Personen eine generell bessere Leistung bei der Reaktion auf Automationsfehler attestiert, sowohl was die Geschwindigkeit der Reaktionen, als auch die Qualität der Reaktionen betraf. Außerdem berichteten die jüngeren Probanden in der Studie ein geringeres Vertrauen in die Automation sowie eine subjektiv niedrigere mentale Beanspruchung durch die Zusammenarbeit mit der Automation. In Abhängigkeit von der mentalen Beanspruchung durch die Interaktion mit einer Automation ergeben sich zusätzliche altersbezogene Unterschiede hinsichtlich der Omission-Fehler (McBride, Rogers & Fisk, 2011). Die Studie von McBride et al. (2011) deutet darauf hin, dass diese Art von Fehlern bei jüngeren Personen hauptsächlich unter Bedingungen mit hoher mentaler Beanspruchung begangen werden, während die Fehler von älteren Personen zwar insgesamt häufiger, aber konstant über die alle Beanspruchungsbedingungen hinweg auftreten. De Visser et al. (2010) konnten zeigen, dass sich die Leistung von Mensch-Automations-Teams in komplexen Situationen unter anderem auf der Grundlage der interindividuelle Unterschiede in der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses vorhersagen lassen.

Zusätzliche potenzielle individuelle Unterschiede bei der Interaktion mit Automation werden von Körber und Bengler (2014) im Kontext von automatisierten Fahrzeugen vermutet. Die Autoren sehen mögliche Einflüsse durch individuelle Reaktionszeiten, die Fähigkeit zur peripheren Wahrnehmung, die individuelle Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung, verschiedene Persönlichkeitseigenschaften (z.B. Neigung zu Langeweile), den Fahrerzustand (z.B. Zirkadianer Rhythmus), sowie psychische Erkrankungen (z.B. Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätssyndrom (ADHS)). Körber et al. (2015) fanden erste Hinweise auf einen Zusammenhang der individuellen Fähigkeit zu Multitasking mit der Leistung bei der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer automatisierten Fahrt.

Auf der Seite der Automation liegt für die Leistung der Kooperation mit dem Menschen ein besonderer Fokus auf der Mensch-Maschine Schnittstelle und der Interaktion mit dem Menschen. Besonders relevant sind hierbei die Art der Automation (was wird wie automatisiert) und der Grad der Automatisierung (welche Aufgaben und Verarbeitungsstufen werden von der Automation übernommen). Relativ gut untersucht sind hierbei verschiedene Auswirkungen des Grads der Automatisierung auf die Leistung des Systems Mensch/Automation (z.B. Endsley, 1999).

Eine Studie von Manzey, Reichenbach und Onnasch (2008) konnte zeigen, dass die Leistung der Studienteilnehmer bei der Steuerung einer komplexen Multitasking-Automation sowohl für die Primäraufgabe als auch für die Sekundäraufgabe von dem simulierten Grad der Automatisierung abhing. Die Primäraufgabe beinhaltete hierbei die leitende Kontrolle der unterschiedlichen Teilsysteme, wobei auf Fehlermeldungen mit der passenden Handlung reagiert werden musste. Die Sekundäraufgabe bestand aus zwei weiteren Teilaufgaben, einer Reaktionszeit-Aufgabe und einer Gedächtnisaufgabe. Die Ergebnisse der Autoren deuten darauf hin, dass bei der Bewältigung einer solchen komplexen Mehrfachaufgabe ein höherer Grad der Automatisierung zu kürzeren Fehleridentifikationszeiten, sowie zu einer besseren manuellen Kontrolle bei der Reaktion auf Fehler beiträgt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Balfe, Sharples und Wilson (2015) hinsichtlich einer reduzierten mentalen Beanspruchung durch ein höheres Level der Automatisierung. Gleichzeitig wurde aber in den Studien unabhängig von der Stufe der Automatisierung das Auftreten eines Automation-Bias (Mosier et al., 1996) festgestellt. Probanden neigen dazu, Fehldiagnosen der Automation nicht zu überprüfen und entsprechend überflüssige oder falsche Handlungen einzuleiten. Dies wird nach Di Nocera, Lorenz und Parasuraman (2005) besonders deutlich, wenn zwischen unterschiedlich hoch automatisierten Aufgaben gewechselt werden muss und ist umso ausgeprägter, je größer die Sprünge zwischen den Automationsstufen sind. Ein Wechsel zwischen Aufgaben, die unterschiedlich hoch automatisiert waren, war in den Studien der Autoren immer mit Leistungseinbußen verbunden, wohingegen ein Wechsel zwischen Aufgaben mit einem gleichen Automatisierungsgrad keine Veränderung der Leistung zur Folge hatte.

Onnasch et al. (2014) fassen in einer Meta-Analyse zu den Auswirkungen unterschiedlicher Automatisierungsgrade auf die Leistung von Menschen die bisherigen Erkenntnisse für diesen Bereich zusammen: Im Normalfall kann ein Mensch in Zusammenarbeit mit einem höheren Grad der Automatisierung auch eine bessere Leistung erzielen. Sobald jedoch die Automation fehlerhaft wird, bzw. Eingriffe durch den Menschen erforderlich werden, führt ein höherer Grad der Automatisierung zu einem stärkeren out-of-the-loop Syndrom und die menschliche Leistung in Zusammenarbeit mit dem System wird akut verschlechtert. Diese Verschlechterung ist besonders ausgeprägt, wenn die Automation dem Menschen die aktive Entscheidung für Handlungsoptionen abnimmt. Die Autoren schlagen daher vor, dass in Systemen, in denen der Mensch potenziell zu einer manuellen Steuerung zurückgeführt werden muss, der Benutzer des Systems zumindest teilweise in die Auswahl von Entscheidungen und Handlungen sowie in die Durchführung dieser Handlungen eingebunden bleiben sollte (Onnasch et al., 2014; S. 486).

Die Reliabilität einer Automation und damit die Signalrate in Bezug zur Fehlerrate des Systems, scheint ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Leistung des Systems Mensch-Automation zu sein. Hancock (2015) sieht die Reliabilität sogar als primäre Vorhersagevariable für das Vertrauen von Menschen in automatisierte Systeme, welches wiederum die Nutzung und die Überwachung solcher Systeme beeinflusst. Bagheri und

Jamieson (2004) konnten in ihrer Studie das Überwachungsverhalten von Nutzern bei der Interaktion mit einer Automation positiv beeinflussen, indem Informationen über die Reliabilität des Systems zur Verfügung gestellt wurden. Die Informationen ermöglichten es den Studienteilnehmern, die Reliabilität der Automation zu jedem Zeitpunkt einzuschätzen, wodurch sich eine Verbesserung der angewendeten Strategien zur Verteilung der Aufmerksamkeit ergab, was wiederum eine Verbesserung der Leistung des Mensch-Automation-Systems zur Folge hatte. Es scheint also nicht nur die tatsächliche Reliabilität einer Automation das Verhalten der Nutzer zu beeinflussen (z.B. Metzger & Parasuraman, 2005), sondern auch die Passung der erwarteten Reliabilität zur tatsächlichen Reliabilität, die durch geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen kommuniziert werden kann. Das Verhältnis von richtigen zu falschen Alarmen, sowie die Anzahl der Fälle, in denen eine Automation keinen Alarm auslöst, obwohl ein Fehler vorliegt, scheint zu beeinflussen, wie sehr sich Nutzer auf eine Automation verlassen, und wie stark sie Entscheidungen oder Meldungen einer Automation in Frage stellen (Dixon & Wickens, 2006). Eine Automation mit höherer Reliabilität produziert also nicht nur für sich gesehen weniger Fehler. Sie führt auch zu einer besseren Leistung des Menschen in Kooperation mit der Automation.

Eine fehlerhafte oder unvollkommene Automation (engl. *imperfect automation*) kann einerseits kritische Zustände im System fälschlicherweise nicht an den Menschen zurückmelden und auch falsche Alarme ausgeben, wenn eigentlich kein Eingreifen des Menschen notwendig gewesen wäre. Diese *misses* und *false alarms* beeinflussen die Interaktion des Menschen mit der Automation (Rovira & Parasuraman, 2010). In einer Studie zu der Zusammenarbeit zwischen einem automatisierten Luftraumüberwachungssystem und Fluglotsen konnten Rovira und Parasuraman (2010) zeigen, dass die Leistung bei der Entdeckung von Konflikten in einem hoch reliablen, aber fehlerhaftem System im Vergleich zu einer manuellen Steuerung stark abnahm. Besonders „misses“, also das Ausbleiben von Alarmen, scheint hierbei einen negativen Einfluss auf die Kooperation zwischen Mensch und Automation zu haben.

Eine Meta-Analyse von Rein et al. (2013) berichtet eine mittlere Automations-Reliabilität von 67%, die in den untersuchten Studien notwendig war, um einen positiven Effekt auf die Leistung der Nutzer mit den Systemen zu haben. Die Autoren diskutieren jedoch, dass selbst bei einer Reliabilität von 75% nicht domänenunspezifisch von einer ausreichenden Reliabilität für alle Anwendungsfälle ausgegangen werden sollte. Zu viele Einflussfaktoren spielen für die Angabe einer ausreichenden Automations-Reliabilität eine Rolle, die teilweise nicht in der Meta-Analyse berücksichtigt werden konnten. Als größte Einflussfaktoren auf die Varianz in den Angaben der ausreichenden Reliabilität geben Rein et al. (2013) die Unterschiede in den Studien hinsichtlich der variierten Faktoren (hits/misses/false alarms), sowie hinsichtlich der sehr unterschiedlichen Aufgabenfelder an, für die jeweils spezifische Reliabilität angemessen und für die Nutzer akzeptabel sein können. Diese Abhängigkeit der Leistung von der Art der Aufgabe konnten beispielsweise Molloy und Parasuraman (1996) zeigen: Eine steigende Komplexität der Aufgabe wirkte sich in dieser Studie negativ auf die Leistung des Systems Mensch-Automation aus. Die Effizienz bei der Entdeckung von Fehlern war bei komplexen Aufgaben im Vergleich zu einer einfachen Aufgabe in einem automatisierten System deutlich verringert.

Alle Auswirkungen der Automation auf die Leistung des Systems Mensch-Automation werden letztlich durch die Mensch-Maschine Schnittstelle modelliert. Auf den Anzeigen entscheidet sich, welche Informationen die Automation dem Menschen zur Verfügung stellt. Umgekehrt manipuliert hier der Mensch mit den durch die Schnittstelle zur Verfügung

gestellten Informationen und Bedienelementen die Automation und entscheidet über die Leistung des Systems in bestimmten Situationen. Die Gestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle kann somit essentiell die Leistung des Systems Mensch-Automation mitbestimmen (z.B. Helldin et al., 2013; Lorenz, Kerschbaum & Schumann, 2014; Wulf et al., 2014). Eine Verbesserung der Interaktion durch die grafische Umgestaltung des Automations-Interface wurde beispielsweise in Kaber, Riley und Tan (2002) für eine Flugzeug-Automation festgestellt. Petermann-Stock et al. (2015) konnten einen Effekt der Modalität der Warnungen, die von der Automation ausgegeben wird, auf die Qualität der Reaktionen auf ein automatisiertes System zeigen. Singh, Molloy und Parasuraman (1997) zeigten hingegen, dass sich bestimmte Automationseffekte bei der Überwachung von automatisierten Systemen nicht durch die Positionierung der Anzeigen beeinflussen ließen. Ebenso stellten Schieben et al. (2014) verschiedene Interaktionskonzepte für einen automatisierten Lenkeingriff vor, die sich hinsichtlich der Qualität der Interaktion mit dem Nutzer nicht zu unterscheiden scheinen. Es kann somit vermutet werden, dass sich negative Auswirkungen von Automation durch die Gestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle moderieren lassen, aber nicht vollständig zu verhindern sind.

Reagiert eine Automation flexibel auf die Leistung, die aus der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Automation entsteht, spricht man von einer adaptiven oder kooperativen Automation. Adaptive Automation scheint Vorteile hinsichtlich der kognitiven Beanspruchung der Benutzer zu haben (z.B. Parasuraman, Cosenzo & De Visser, 2009; Rauch et al., 2009). Nach Scerbo (2006) zeichnet sich eine adaptive Automation dadurch aus, dass sowohl der Benutzer als auch das System Veränderungen im Grad der Automatisierung initiieren können. Diese Veränderungen können sowohl aktiv durch den Nutzer gewünscht werden (z.B. wenn eine Situation als nicht von der Automation handhabbar wahrgenommen wird), oder automatisch von der Automation initiiert werden (z.B. wenn eine kognitive oder motorische Überforderung des Nutzers detektiert wird). Die Frage, von welcher Seite die Entscheidung für eine Veränderung des Grades der Automatisierung sinnvollerweise ausgehen sollte, lässt sich hierbei nicht verallgemeinernd beantworten, da in spezifischen Situationen jeweils sowohl der Mensch als auch die Automation die relevanteren Informationen und besseren Gründe für eine Änderung besitzen kann (Moray, Inagaki & Itho, 2000). Ansätze für die Gestaltung solcher problematischen Automation bietet das Konzept der kooperativen Automation (z.B. Löper, Kelsch & Flemisch, 2008), die von einer flexiblen Abstimmung zwischen Mensch und Automation über auszuführende Handlungen ausgeht, ähnlich wie sie idealerweise in einem rein menschlichen Team geschieht.

2.5. Fazit

Es gibt sehr gute Gründe, Aufgaben zu automatisieren. Die bisherige Darstellung macht aber auch deutlich, dass bei der Interaktion von Menschen mit Automation nicht alle Vorteile ohne weiteres voll genutzt werden können und vielmehr eine ganze Reihe neuer Probleme auftauchen können. Zusammenfassend treten diese einerseits immer dann auf, wenn Aufgaben nicht völlig automatisiert sind, sondern der Mensch mit unterschiedlichen Graden von Automation konfrontiert wird. Dadurch ändert sich die Aufgabe des Menschen, wodurch unangenehme und schwierige neue Aufgaben entstehen können. Andererseits treten Probleme dann auf, wenn sich der Grad der Automation und damit die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Automation ändern.

Der Literaturüberblick in Kapitel 2.4 zeigt, dass die Potenziale einer Unterstützung des Menschen durch Automation im Hinblick auf die Gesamtleistung des Systems Mensch-Automation häufig nicht voll ausgeschöpft werden, aus einer Vielzahl von Gründen. Neben

einer ganzen Reihe von Hinweisen, was dabei nicht funktioniert, besteht hier hinreichend Forschungsbedarf, diese Kooperation weiter zu entwickeln und zu verbessern.

Vor dem Hintergrund der anfangs dargestellten Entwicklungen im Automobilbereich erscheint momentan allerdings vor allem der zweite Problembereich relevant, die Veränderung des Grades der Automation und damit der Wechsel bei der Arbeitsteilung. Wie lange brauchen Fahrer, um von der Rolle des Passagier, der von der Automation gefahren wird, wieder aktiv selbst zu fahren? Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über vorliegende Studien zu diesem Themenbereich. Da dies den Fragestellungen des vorliegenden Projekts entspricht, werden diese Studien deutlich ausführlicher dargestellt, als es bei denen des ersten Teils der Fall war.

3. Übergabe von Automation zu manueller Steuerung: Take Over Requests

Eine ganz zentrale Situation bei der Interaktion zwischen Menschen und Automation ist die Übernahme der manuellen Steuerung in einem Fahrzeug nach einer Phase der hohen Automation. Hierbei können potenziell alle in Abschnitt 2 beschriebenen Automationseffekte auftreten und sich entsprechend auf die Leistung des Menschen in dieser Situation auswirken. Im folgenden Abschnitt werden zunächst spezielle Problemfelder im Umgang mit automatisierten Systemen im Fahrzeug beschrieben und hierbei besonders auf den Wechsel von automatisierten Fahrfunktionen zu einer manuellen Steuerung eingegangen. Anschließend wird ein Fokus auf die Übernahmezeiten bei der Übergabe aus einer hochautomatisierten Fahrt (Längs- und Querführung dauerhaft automatisiert) in die manuelle Fahrt gelegt und vorhandene Studien zu diesem Thema dargestellt, zusammengefasst und diskutiert.

3.1. Automation von Fahrfunktionen im Fahrzeug

Automation im Fahrzeug kann viele Formen annehmen und entsprechend der Klassifizierung von Parasuraman et al. (2000) nach dem Grad der Automatisierung sowie nach der Ebene, auf der der Mensch unterstützt wird, kategorisiert werden (Informationsaufnahme, Informationsanalyse, Entscheidungsauswahl, Handlungsausführung). Manche automatisierten Systeme sind zu einem Standard in neueren Fahrzeugen geworden (z.B. Anti-Blockier-System (ABS), Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)), und haben gleichzeitig einen sehr hohen Grad der Automatisierung erreicht, mit dem sie die meiste Zeit von dem Fahrer nicht mehr wahrgenommen werden. Andere Systeme, die noch nicht eine so hohe Verbreitung erreicht haben oder den Fahrer nur auf einer Ebene unterstützen (z.B. Nachsichtsysteme, Spurhalteassistenten, Adaptive Geschwindigkeitskontrolle (ACC)) müssen bezüglich der Interaktion mit dem Menschen so gestaltet werden, dass negative Automationseffekte minimiert werden und ein größtmöglicher Grad an Entlastung und Sicherheit für den Fahrer gewährleistet ist.

Als besonders relevant für die Gestaltung von automatisierten Funktionen werden das Nachlassen der Daueraufmerksamkeit (Vigilanz-Dekrement; Parasuraman & Davies, 1977), der Verlust des Situationsbewusstseins (Kaber et al., 2006), Mode Confusion/Mode Error (Degani et al., 1999), das Out-of-the-loop Performance Problem (Endsley & Kiris, 1995), sowie die Out-of-the-loop Unfamiliarity (Wickens & Hollands, 2000) angeführt. Alle diese negativen Automationseffekte und weitere Probleme von Mensch-Automation-Interaktion sind besonders relevant bei der Interaktion mit teilautomatisierten Fahrfunktionen (insbesondere ACC und Spurhalteassistenten), sowie für zukünftige hochautomatisierte Fahrzeuge (Jamson et al., 2013; De Winter et al., 2014). Saffarian, De Winter & Happee (2012) diskutieren als besondere Herausforderungen der Interaktion zwischen Menschen und automatisierten Fahrzeugen Overreliance und Complacency, Verhaltensanpassung und Risikohomöostase, unregelmäßige Schwankungen in der kognitiven Beanspruchung, Fähigkeitsverlust, das Aufrechterhalten des Situationsbewusstseins, sowie ein fehlerhaftes mentales Modell der Funktionsweise der Automation. Die Autoren sehen entsprechend im Fokus der Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen die Gestaltung des Übergangs der Autorität vom Mensch zur Automation (und umgekehrt), sowie die Gestaltung des Feedbacks, das die Automation über ihren Zustand an den Menschen zurückgeben kann.

Die dringlichsten Herausforderungen bei der Automation von Fahrfunktionen scheinen das dauerhafte Aufrechterhalten von Aufmerksamkeit, sowie die Übernahme der manuellen

Kontrolle über eine vorher automatisierte Funktion darzustellen. Frühe Fahrsimulationsstudien von Stanton und Young (1998) und De Waard et al. (1999) weisen schon auf diese Aspekte hin. So wurde zwar in beiden Studien eine Reduktion der mentalen Beanspruchung sowie eine Verbesserung der Spurhaltung in der automatisierten Bedingung im Vergleich zu einer manuellen Fahrt diskutiert. Jedoch konnten die Autoren auch zeigen, dass Probanden in bestimmten Situationen nicht in der Lage waren, adäquat auf einen Ausfall der Automation zu reagieren. Hierdurch kam es während der Simulationen zu Kollisionen mit vorausfahrenden Fahrzeugen, da einige Fahrer nicht oder nur verspätet, auf die kritische Situation reagieren konnten (Stanton & Young, 1998). In De Ward et al. (1999) betraf dies sogar ungefähr die Hälfte der teilnehmenden Fahrer.

In neueren Studien konnten diese Effekte repliziert werden: Merat und Jamson (2009) fanden eine Verschlechterung der Reaktionszeiten bei der Überwachung einer automatisierten Fahrt, wobei die Autoren vermuten, dass die Fahrer auf den Alarm warteten, der auf einen Ausfall des Systems hinwies, anstatt selber aus der Situation gegebene Indikatoren zu nutzen. Diese Interpretation weist auf eine für Automation typisches vergrößertes Complacency-Potential hin, da vorhandene Reize aus der Umgebung durch Heuristiken auf Grundlage der von der Automation zur Verfügung gestellten Hinweise ersetzt wurden. Vollrath, Schleicher und Gelau (2011) argumentieren hingegen, dass die Verzögerungen bei der Übernahme der manuellen Kontrolle auf die Anforderungen an die kognitive Verarbeitung der Situation sowie auf die Anforderungen an die motorische Reaktionssequenz zurückzuführen seien. Die Autoren untersuchten in der Studie die Unterschiede zwischen Reaktionen, in denen ein manueller Eingriff bei der Fahrt mit ACC notwendig war, mit einer Fahrt mit einem Tempomaten ohne automatische Abstandskontrolle und einer manuellen Kontrollfahrt. Hierbei wurden für beide Stufen der Automation verzögerte Fahrerreaktionen auf Situationen gefunden, in denen ein manueller Eingriff notwendig war.

Verschiedene Autoren berichten von deutlichen Veränderungen des Fahrverhaltens, wenn automatisierte Fahrfunktionen im Fahrzeug aktiv sind. Muhrer, Reinprecht und Vollrath (2012) konnten am Beispiel eines Frontal-Kollisionswarners zeigen, dass durch die fehlende Erwartung einer notwendigen Reaktion verlangsamte Reaktionen auf kritische Fahrsituationen entstehen können. In den Versuchen konnte dieser Effekt nur durch automatische Eingriffe des Systems vermieden werden. Saffarian, Happee und De Winter (2012) diskutieren, dass in bestimmten Situationen eine automatisierte Fahrt als subjektiv risikoreicher wahrgenommen werden kann als eine manuelle Fahrt. In der Studie wurde eine manuelle Fahrt durch dichten Nebel mit einer automatisierten Fahrt durch dichten Nebel verglichen, wobei sich signifikante Unterschiede zwischen den subjektiven Risikobewertungen nachweisen ließen, insbesondere wenn kein Führungsfahrzeug mehr sichtbar war. In Jamson et al. (2013) wurde die Auswirkung von automatisierten Fahrfunktionen auf das Fahrverhalten (Distanz zum Führungsfahrzeug und Anzahl der Überholvorgänge) sowie die Tendenz zur Aufnahme fahrfremder Tätigkeiten während einer automatisierten Fahrt untersucht. Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass Fahrer bei Verfügbarkeit von Automation dazu neigen, auf Kosten einer verlängerten Fahrtzeit die Anzahl der Fahrmanöver zu verringern, sowie einen größeren und konsistenteren Abstand zum Vorderfahrzeug zu halten. Gleichzeitig wurden vermehrt fahrfremde Tätigkeiten durchgeführt. Die Autoren interpretieren diese Kombination so, dass Fahrer bereitwillig eintönige Fahraufgaben abgeben, um sich stärker mit Entertainment-Funktionen im Fahrzeug zu beschäftigen. Zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich des Fahrverhaltens mit automatisierten Fahrfunktionen kamen Kircher, Larsson und Hultgreen (2014). Die Autoren

vermuten auf Grundlage eines Fahrsimulationsversuchs, dass Fahrer in der Lage sind, ihr Verhalten nicht nur entsprechend des Grades der Automatisierung anzupassen, sondern dass automatisiertes Fahren von den Probanden als eine taktisch grundsätzlich andere Aufgabe als eine manuelle Fahrt verstanden wurde. In den Versuchen wurde die Automation von den Teilnehmern benutzt, um bestimmte Fahrmanöver, wie zum Beispiel das Abfahren von einer Autobahn, oder das Verlangsamen des Fahrzeugs vor einer Unfallstelle mit Hilfe der Funktionen der Automation zu bewältigen.

„Drivers do not just seem to react to automation, but rather interact with automation [...]“. “[...] drivers integrate the behavior of the automation into their tactical planning of the whole situation instead of only reacting to the responses of the automation”. (Kircher et al., 2014, S. 166)

Die Übernahme der manuellen Steuerung aus einer Phase der Automation stellt den Fahrer vor eine Herausforderung. Zunächst muss ein Wechsel von einer Aufgabe zu einer andersartigen Aufgabe stattfinden. Ein solcher Wechsel verursacht nach Meiran, Chorev und Sapir (2000) Wechsel-Kosten mit mindestens drei Komponenten: (1) Die Kosten für das „Zerstreuen“ der vorherigen Aufgabe, die eine Art Nachbereitung und Abklingen der zuvor geforderten kognitiven Leistungen darstellt. (2) Die Vorbereitungskosten für die bevorstehende Aufgabe, die die kognitiven Prozesse für die Umstellung zwischen benötigten Ressourcen reflektiert. (3) Eine Rest-Komponente, die bei einem Wechsel ohne Zeitdruck entsteht. Durch diese Aufgabenwechsel-Kosten können Verzögerungen während des Aufgabenwechsels, sowie Fehler und verlangsamte Reaktionszeiten nach dem Aufgabenwechsel entstehen (Monsell, 2003).

Wechsel zwischen Aufgaben können in zwei unterschiedlichen Modi stattfinden (Wickens & McCarley, 2008): Der Fahrer könnte die aktuelle Aufgabe (z.B. das Schreiben einer Email) fortführen und gleichzeitig beginnen die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, oder der Fahrer könnte die aktuelle Aufgabe unterbrechen und sich sequentiell der neuen Aufgabe (der Übernahme der Steuerung des Fahrzeugs) zuwenden. Gehen wir von einer vollständigen Fokussierung auf die Übernahme nach einer dringenden Übernahmeaufforderung aus, greifen nach Wickens, Santamaria und Sebok (2013) Effekte des *Task Switching*. Zu diesen Effekten gehört die Neigung, das Wechseln von Aufgaben zu vermeiden, wenn damit Kosten im Sinne von kognitiver oder motorischer Beanspruchung verbunden sind. Diese Neigung wird noch verstärkt, wenn die neue Aufgabe als schwieriger als die ursprüngliche Aufgabe wahrgenommen wird. Weiterhin haben laut der Autoren die Priorisierung der Aufgaben, das Interesse an den Aufgaben, sowie die Salienz des Hinweises auf die Aufgabe einen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Aufgabenwechsels. Bezogen auf den Übernahmeprozess in einem hochautomatisierten Fahrzeug lässt sich vermuten, dass diese basalen Prozesse zumindest teilweise auf die komplexere Situation übertragen werden können. Zusammen mit höheren kognitiven Prozessen, wie dem Situationsbewusstsein (z.B. Endsley, 1988) oder dem Vigilanz-Dekrement (z.B. Parasuraman & Davies, 1977) tragen die kognitiven Abläufe bei dem Wechsel zwischen einer Nebenaufgabe und der Kontrolle über das Fahrzeug zu Verzögerungen und Verschlechterungen bei der Reaktion auf Übernahmeaufforderungen bei.

Diese Effekte manifestieren sich in dem Fahrverhalten und dem Fahrerlebnis im Moment des Übergangs zwischen Automation und Mensch. In Fahrsimulationsstudien von Varotto et al. (2015) wurde ein Effekt des Übergangs von einer automatisierten Fahrt auf eine manuelle Fahrt in den Fahrdaten während und nach der Übernahme der Kontrolle festgestellt. Die

gefährtere Geschwindigkeit, die Längsbeschleunigungen, sowie der Abstand zu den vorausfahrenden Fahrzeugen änderten sich in diesen Situationen im Vergleich zu einer manuellen Fahrt. Konkret verlängerten die Fahrer ihren Abstand zum Vorderfahrzeug nach einem simulierten Sensorausfall bzw. nach einem manuellen Abschalten der Automation und verringerten außerdem ihre Geschwindigkeit deutlich. Die Autoren vermuten vor allem einen Einfluss einer Übernahme auf die Geschwindigkeit und Längsbeschleunigungen in der Phase nach Abschalten der Automation, wodurch sich zusätzliche Konflikte mit umgebendem Verkehr ergeben könnten. Bezogen auf das subjektive Erleben der Übernahme wurde zum Beispiel von Lee, Joo und Nass (2014) untersucht, wie sich der Grad der Automatisierung des Fahrzeugs auf die User Experience bei der Benutzung auswirkt. Die Ergebnisse der Autoren deuten darauf hin, dass hochautomatisiertes Fahren anders wahrgenommen wird als die bloße Automation von Längs- oder Querführung. Höhere Grade der Automation wurden als intelligenter bewertet, induzierten bei den Probanden aber auch größere Nervosität hinsichtlich der Sicherheit während der Fahrt. Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass sich ein hohes Maß an Automation im Fahrzeug auf den Ebenen des taktischen, sowie des unmittelbaren Fahrverhaltens der Fahrer in Übernahmeszenarien auswirkt und hierbei außerdem subjektive Effekte auf die Wahrnehmung der Automation auftreten.

Diese Effekte können auch im Fahrzeug durch die Mensch-Automation Schnittstelle moderiert sein, die Zustände der Automation kommuniziert, sowie im Falle einer Übergabe der Steuerung Warnungen und Alarme ausgibt. Hinweise zur Gestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Automation und Designvorschläge finden sich zum Beispiel in Flemisch et al. (2011). Die Autoren schließen, dass gerade in hochautomatisierten Systemen über die Schnittstelle sichergestellt bleiben sollte, dass der Fahrer über den aktuellen Status der Automation sowie die nächsten Aktionen und aktuellen Grenzen der Automation informiert bleibt (siehe auch Seppelt & Lee, 2007). So könne Mode Confusion vermieden und im Falle einer Übernahme falschen Reaktion vorgebeugt werden. Außerdem sollten Warnungen mit mehrfach gestuften Eskalationsstufen implementiert werden, die jeweils auf die Reaktionen (oder Nicht-Reaktionen) des Fahrers eingehen. Vielversprechend scheinen auch Konzepte zu sein, die den Fahrer ständig über die Reliabilität der Automation zu jedem Zeitpunkt informieren, wodurch schon in vor dem eigentlichen Auftreten einer Warnung eine erhöhte Reaktionsbereitschaft des Fahrers hervorgerufen wird (z.B. Helldin et al., 2013).

Einen anderen Ansatz verfolgen beispielsweise Abbink, Mulder und Boer (2012), die den haptischen Kanal als Möglichkeit zur Rückmeldung der Automation über Systemzustände und Probleme vorschlagen. Vergleichbar ist dieser Ansatz mit der von Flemisch et al. (2003) vorgeschlagenen H-Metapher, die die Metapher von Pferd und Reiter vorschlägt, um eine optimale Kooperation zwischen Automation und Mensch zu gestalten. Das Pferd findet hierbei grundsätzlich selbst den Weg. Der Reiter übernimmt nur die Planung der Strecke. Hierbei kann je nach Situation der Zügel enger oder weiter gehalten werden, was jeweils ein intensiveres Feedback zwischen Reiter und Pferd sowie eine genauere Kontrolle ermöglicht. Die Anwendung dieser Metapher auf das hochautomatisierte Fahren findet sich zum Beispiel in Damböck et al. (2011).

3.2. Review bisheriger Studien zu Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt zu manueller Steuerung

Bislang ist nur eine begrenzte Zahl an Studien zu konkreten Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt veröffentlicht worden. Trotz der geringen Anzahl der veröffentlichten Arbeiten ist hierbei eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, Operationalisierungen und Kriterien zum Einsatz gekommen, wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht immer gegeben ist. Mithilfe der gängigen Suchmaschinen wurde eine ausführliche Literaturrecherche zu diesem Thema durchgeführt, und Studien entsprechend der im Folgenden dargestellten Kriterien gesammelt und zusammengefasst.

3.2.1. Review Kriterien

Um trotz der vielfältigen Methoden, die in den Studien zu Übernahmezeiten von hochautomatisierter Fahrt zum Einsatz kommen, eine möglichst gute Vergleichbarkeit der dargestellten Studien zu gewährleisten, wurden qualitative Kriterien angelegt, zu denen alle berücksichtigten Studien Informationen beinhalten mussten.

- In den Studien wurde eine Übergabe aus einer Phase der hochautomatisierten Fahrt (siehe Definition BASt, Stufe 3 der Fahrzeugautomatisierung, Gasser et al., 2012) zu einer manuellen Steuerung untersucht.
- Die Teilnehmer der Studien hatten während des Versuchs die Hände zumindest teilweise vom Lenkrad gelöst, sowie die Füße von den Pedalen entfernt.
- Die Teilnehmer der Studien wurden von mindestens einer Art von Warn- oder Hinweisreiz auf die bevorstehende Übergabe hingewiesen.
- Die Studien gehen davon aus, dass das Fahrzeug in der Lage ist, dem Fahrer einen Zeit-Puffer zur Verfügung zu stellen, bevor die Kontrolle über das Fahrzeug übernommen werden muss.
- Die Zeit, die die Teilnehmer für die Übernahme der manuellen Steuerung benötigten, wurde in der Studie berichtet.
- Der Zeitpunkt, der als erfolgreiche Übernahme definiert wurde, wurde in der Studie berichtet.
- Die Studie berichtet die Art des verwendeten Simulators/Realfahrzeugs, die Gestaltung der Fahr-Szenarien, sowie die Zusammensetzung der Stichprobe.

Zusätzlich zu diesen minimalen Kriterien unterschieden sich die Studien hinsichtlich des Vorhandenseins und des Charakters von Nebenaufgaben, sowie in dem Grad der Überwachung der Fahraufgabe während der automatisierten Fahrt, der in den Instruktionen der Probanden festgelegt wurde. Diese Kriterien werden jeweils zusätzlich berichtet. Die Studien sind nach dem Zeitpunkt der Veröffentlichung geordnet, um die Entwicklung der verwendeten Methoden und Szenarien zu verdeutlichen. Alle gefundenen Studien, die vor dem Jahr 2009 veröffentlicht wurden, gehen von einer Rolle des Fahrers aus, die noch sehr stark an die Definition der Supervisory Control (Sheridan, 1987) bzw. an die zweite Stufe des automatisierten Fahrens nach der Definition der BASt (Gasser et al., 2012) angelehnt ist, in der also der Fahrer in jeder Situation bereit sein muss, die Kontrolle über das Fahrzeug ohne einen Zeitpuffer zu übernehmen. Nur Studien, die von einem Fahrer „out-of-the-loop“ (Endsley & Kiris, 1995) ausgehen, wurden hier betrachtet, wodurch sich der Fokus des Reviews auf die Jahre 2009-2015 ergibt.

3.2.2. Toffetti, Wilschut, Martens, Schieben, Rambaldini, Merat & Flemisch (2009)

Die Veröffentlichung *CityMobil: Human Factor Issues Regarding Highly-automated Vehicles on an eLane* von Toffetti et al. (2009) beschreibt die Erkenntnisse aus Studien zu hochautomatisiertem Fahren, die im Rahmen des CityMobil Projekts durchgeführt wurden. Das CityMobil Projekt hatte die Entwicklung und Demonstration von automatisierten Transportsystemen in verschiedenen urbanen Umgebungen zum Ziel und wurde im Dezember 2011 abgeschlossen. In der vorliegenden Studie lag der Fokus auf den Reaktionen eines Fahrers auf Systemfehler und unerwartete Ereignisse, die während einer hochautomatisierten Fahrt auf einer sogenannten eLane – einer postulierten speziellen Infrastruktur für hochautomatisierte Fahrzeuge – auftreten und eine Übernahme durch den Fahrer auslösen.

Das Experiment wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit einer Stichprobe von $N = 24$ Teilnehmern (Alter zwischen 21 und 46 Jahren; 5 weiblich) durchgeführt. Das simulierte Szenario war eine dreispurige Straße mit einer Spurbreite von vier Metern und einem zusätzlichen Standstreifen mit einer Breite von 2.5 Metern. Die simulierte Verkehrsdichte garantierte die Sichtbarkeit von vier bis fünf Fahrzeugen vor dem Ego-Fahrzeug. Die Versuchspersonen waren instruiert, eine konstante Geschwindigkeit von 70 km/h zu halten. Die automatisierten Abschnitte der Fahrt fanden nur auf einer speziell gekennzeichneten eLane statt und waren mit Hilfe der Wizard of Oz Technik realisiert, in der ein Versuchsleiter per Remote-Steuerung die Kontrolle über das Fahrzeug übernahm, sobald die Teilnehmer die automatisierte Fahrt aktivierten. Die Teilnehmer wurden nicht im Voraus über diese Art der Realisierung der automatisierten Fahrt aufgeklärt.

Die Versuchspersonen wurden weiterhin instruiert, eine Nebenaufgabe während der Fahrt durchzuführen. Die Aufgabe bestand aus der Interaktion mit einem fahrzeuginternen Multimedia-System, das die Teilnehmer über eine aufgenommene Stimme dazu aufforderte, bestimmte Eingaben in das System durchzuführen (z.B. „press TEL button“; „dial 25 47 85“). Die Aufgaben wurden zu randomisierten Zeitpunkten präsentiert.

Die Hinweisreize für das Auftreten eines Systemfehlers und die Notwendigkeit zur Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer wurde durch zwei Varianten einer Warnung realisiert. Das „Acoustic Interface“ präsentierte eine visuelle Warnung in Kombination mit einem Ton. Das „Vocal Interface“ präsentierte eine einfachere visuelle Warnung in Kombination mit der gleichen akustischen Warnung und zusätzlich einen sprachlichen Hinweis, der auf den Ton folgt. Das Experiment wurde als Messwiederholung durchgeführt, wobei allen Versuchspersonen die beiden Warn-Varianten in jeweils drei Fahrbedingungen (Baseline, manuelle Fahrt, automatisierte Fahrt) in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden. Während der Fahrten traten jeweils drei Szenarien auf, die eine Reaktion der Fahrer erforderten: Einfahrt-/Ausfahrt auf/aus der eLane; Ausfall der Verkehrsinfrastruktur; Systemfehler.

Der Zeitpunkt der Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer wurde für das Experiment relativ ungenau berichtet als „time to take the control“. Die Formulierung lässt vermuten, dass der Zeitpunkt für die Übernahme als Kombination aus „Hände am Lenkrad“ und „Füße an den Pedalen“ definiert wurde. Weiterhin wurde die Zeit bis zur Übernahme nicht als Zahlenwert, sondern nur in einer Grafik berichtet. Die Übernahmezeit für das *Vocal Interface* bei einem Systemfehler liegt demnach bei einem Mittelwert von $M = 3.77$ Sekunden mit einer Standardabweichung von $SD = 0.47$ Sekunden. Für das *Acoustic Interface* wurden bei einem Systemfehler signifikant längere Reaktionszeiten mit einem Mittelwert von $M = 5.18$

Sekunden und einer Standardabweichung von $SD = 1.35$ Sekunden grafisch dargestellt (siehe Abbildung 2.). Für die Szenarien Einfahrt-/Ausfahrt aus der *eLane*, sowie für den Ausfall der Verkehrsinfrastruktur wurden keine eindeutigen Reaktionszeiten berichtet, die sich aus den grafischen Darstellungen nachvollziehen lassen. Die Auswertung der subjektiven Daten ergab eine deutliche Präferenz der Versuchsteilnehmer für das *Vocal Interface* (70%), das als verständlicher, eindeutiger und leichter zu erlernen charakterisiert wurde.

Der Fokus der Studie von Toffetti et al. (2009) lag weniger auf den benötigten Übergabezeiten, als auf dem Vergleich und der Evaluation von verschiedenen Warnkonzepten. Die berichteten Zeiten für die Übernahme nach einem Systemfehler sind demnach nur eingeschränkt generalisierbar, zumal die Definition des Übernahmezeitpunktes nicht eindeutig ist. Außerdem geht nicht eindeutig aus den berichteten Ergebnissen hervor, ob der Fahrer zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung durch die (nicht kontinuierliche) Nebenaufgabe abgelenkt war. Die Zeitspanne zwischen ca. 3 bis 6 Sekunden kann somit als

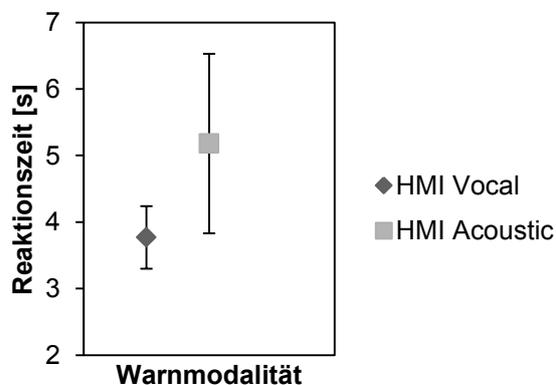


Abbildung 2: Mittlere Reaktionszeiten auf einen Systemfehler in Abhängigkeit von der verwendeten Warnmodalität. Modifiziert nach Toffetti et al. (2009), S. 10.

ein erster Hinweis auf die mögliche Dauer einer Übernahme sowie auf die starke Abhängigkeit der Übernahmedauer von der Gestaltung der Mensch-Maschine Schnittstelle gewertet werden. Zusätzliche Einschränkungen ergeben sich aus der Größe der Stichprobe und der Verwendung des *eLane* Konzeptes, das eine dedizierte Verkehrsinfrastruktur für die automatisierte Fahrt voraussetzt.

3.2.3. Damböck, Farid, Töner & Bengler (2012)

Die Studie von Damböck und Kollegen (2012) thematisiert als eine der ersten Veröffentlichungen konkret die *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*, während der Fahrer durch eine Nebenaufgabe motorisch, visuell und kognitiv vollständig abgelenkt ist. Das Ziel der Studie war somit die Ermittlung einer „Mindestzeit für eine sichere und komfortable Übernahme“ (S. 3) aus einer komplexen Fahrsituation.

Das Experiment verwendete einen statischen Fahrsimulator, in dem $N = 32$ Versuchsteilnehmer (Alter zwischen 22 und 73 Jahren, $M = 42.5$, $SD = 15.8$; 10 Frauen) den Versuch durchführten. Die simulierten komplexen Szenarien wurden anhand der Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges (1982), sowie anhand des Handlungsmodells nach Rasmussen (1986) klassifiziert und entwickelt. Als der fertigkeitbasierten Ebene/Stabilisierungsebene zugehörig wurde ein Szenario entwickelt, in dem die Fahrbahnmarkierungen wegfallen. Als der regelbasierten Ebene/Führungsebene zugehörig

wurde ein Szenario entwickelt, in dem ein Fahrstreifenwechsel aufgrund einer Fahrbahnverengung notwendig wird. Für ein Szenario auf der wissensbasierten Ebene/Navigationsebene wurde schließlich eine Situation gewählt, in der ein Fahrstreifen auf der Grundlage eines Zielfahrstreifens ausgewählt werden muss. Für jedes dieser Szenarien wurde eine klare Systemgrenze (Streckenmeter) definiert, nach deren Überschreiten die Übernahme stattgefunden haben musste, um eine sichere Übernahme zu gewährleisten. Die Verkehrsdichte wurde in den Szenarien „Fahrbahnverengung“ und „Fahrbahnenteilung“ so definiert, dass jeweils eine Zeitlücke von 4 Sekunden zum Einscheren in den Verkehr blieb. Im Szenario „Fahrbahnmarkierungen“ war die Straße zusätzlich gekrümmt.

Die Versuchspersonen waren instruiert, mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h zu fahren, der Beschilderung zu folgen und Fahrspurwechsel wie in der Realität abzusichern. Die Probanden wurden weiterhin instruiert, eine Nebenaufgabe während der gesamten Zeit der Fahrt zu bearbeiten und sich auf diese Nebenaufgabe zu konzentrieren. Zusätzlich war die Leistung in der Nebenaufgabe mit der Versuchspersonenvergütung verknüpft. Die Nebenaufgabe bestand aus einer zweidimensionalen Tracking-Aufgabe, in der eine sich zufällig bewegende Zielscheibe auf dem Bildschirm eines Laptops mit einem Fadenkreuz verfolgt werden sollte. Der Laptop war hierbei auf dem Beifahrersitz positioniert. Das Fadenkreuz wurde über einen beidhändig zu bedienenden Spiele-Controller gesteuert, der in einer Übernahmesituation zunächst in der Mittelkonsole abgelegt werden musste.

Für die Szenarien wurden Kriterien für eine erfolgreiche und komfortable Übernahme festgelegt. Für jedes der Szenarien wurden außerdem mögliche Fehler definiert. Die Kriterien waren jeweils für die Szenarien:

- Fahrbahnmarkierung: Das Ego-Fahrzeug wurde erfolgreich innerhalb des gedachten Fahrstreifens gehalten (trotz der gekrümmten Straße).
- Fahrbahnverengung: Der Beginn des Fahrstreifenwechsels musste vor dem Zeitpunkt liegen, zu dem das Ego-Fahrzeug nicht mehr in voller Breite in den sich verengenden Fahrstreifen passt.
- Fahrbahnenteilung: Das Ego-Fahrzeug hatte den Fahrstreifenwechsel auf den vorgegeben Zielfahrstreifen vollständig abgeschlossen.

Der Hinweis auf eine bevorstehende Übernahme der Steuerung erfolgte in diesem Versuch über ein unspezifisches, auditives Signal.

Der Versuch war als Messwiederholung konzipiert, in dem allen Versuchspersonen alle Szenarien sowie die drei verschiedenen Zeiten, die zwischen einer Übernahmeaufforderung und dem Erreichen der Systemgrenze lagen (4, 6, oder 8 Sekunden), in permutierter Reihenfolge präsentiert wurden. Zusätzlich wurde als Baseline jedes der Szenarien von den Probanden auch ohne aktivierte Automation und ohne Bearbeitung der Nebenaufgabe durchfahren. Zwischen den Startpunkten der Szenarien wurde jeweils ein Zeitraum der automatisierten Fahrt ohne Übernahmeaufforderungen von 4 Minuten realisiert.

Die Ergebnisse der Studie deuten auf eine Abhängigkeit der benötigten Übernahmezeit von der Komplexität bzw. der benötigten Ebene der Fahrzeugführung/Handlungskontrolle hin. Auf der Stabilisierungsebene (Szenario Fahrbahnmarkierungen) wurde das Kriterium für eine erfolgreiche Übernahme von allen Probanden bei einer Übernahmezeit von 4 Sekunden erfüllt. In den Szenarien Fahrbahnverengung und Fahrbahnenteilung wurden hingegen auch bei einer Übernahmezeit von 6 Sekunden noch signifikant mehr Fehler gemacht als in der

Baseline. Bei einer Übernahmezeit von 8 Sekunden war kein signifikanter Unterschied zwischen den Fehlerzahlen im Vergleich zur Baseline mehr nachzuweisen, wobei auch hier immer noch 9 Probanden die Fahrspur zu spät, falsch oder noch gar nicht gewechselt hatten.

Die Autoren schließen aus diesen Ergebnissen, dass aufgrund der konservativen Kriterien, die für eine erfolgreiche Übernahme auf der Führungs- und Navigationsebene angelegt wurden, bei einer Übernahmezeit von 8 Sekunden eine vergleichbare Leistung wie bei einer manuellen Fahrt erreicht wird. Hierzu passend sind auch die Ergebnisse zu der subjektiven Bewertung des Komforts bei der Übergabe, die zwischen einer Übernahmezeit von 6 und 8 Sekunden nicht mehr signifikant anstieg. Auf dieser Grundlage sowie auf der Grundlage der Probandeninstruktion, die die Versuchsteilnehmer anwies, die Übernahme komfortabel zu gestalten, und Notfallmanöver zu vermeiden, schließen die Autoren auf eine *sichere* Übergabezeit, die eher noch unter den Ergebnissen von 6-8 Sekunden für eine *komfortable* Übergabezeit liegt.

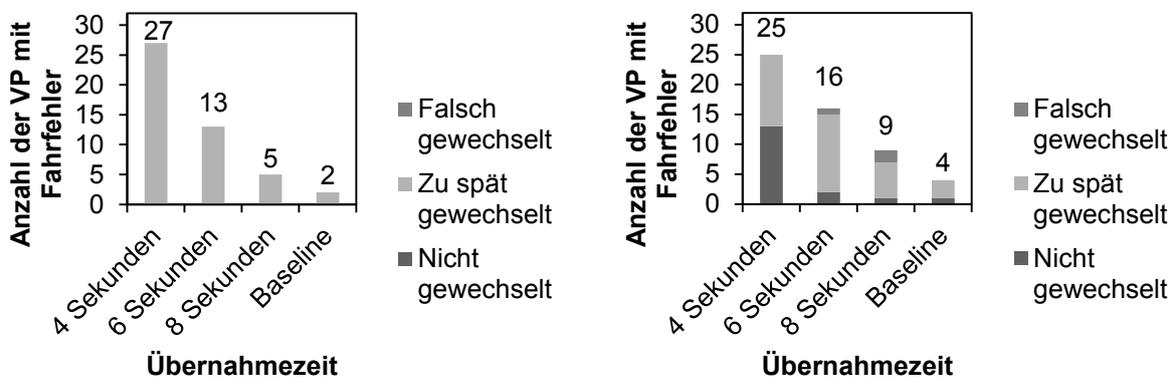


Abbildung 3: Anzahl der Versuchspersonen mit Fehler bei der Aufgabenerfüllung in Abhängigkeit von der Übernahmezeit bzw. bei der Baselinefahrt. Links: Fahrstreifenwechsel auf die Nebenspur (N = 32). Rechts: Fahrstreifenwechsel in eine von einem Straßenschild vorgegebene Richtung (N = 32). Modifiziert nach Damböck et al. (2012), S. 8.

In der Studie von Damböck et al. (2012) wird deutlich, dass der gemessene Wert für eine Übernahmezeit aus einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung sehr stark von der Definition einerseits einer *sicheren* und andererseits einer *komfortablen* Übergabe abhängt. Die Definition der Zeitpunkte, zu denen die Übergabe als abgeschlossen und erfolgreich betrachtet wird, ist stark von der Gestaltung des Experiments sowie von der gewählten Messmethode abhängig. Außerdem zeigt sich in der Studie deutlich die Abhängigkeit der gemessenen Zeit von der Auswahl und Gestaltung der simulierten Szenarien. Die Studie bietet gute Hinweise auf einen Zeitbereich, der von automatisierten Fahrsystemen bis zum Erreichen einer Systemgrenze zur Verfügung gestellt werden sollte, lässt jedoch durch die Integration der relativ weit gestufte Zeit (4, 6, und 8 Sekunden) als unabhängige Variable im Versuchsdesign viel Spielraum für Interpretation. Zudem wurden in der Studie auch bei einer Übernahmezeit von 8 Sekunden Fehler bei der Übernahme beobachtet. Die Sicherheit einer Übernahmezeit ist also abhängig von der Festlegung des Grenzwertes, der bei einem solchen sicherheitskritischen System vertretbar ist.

3.2.4. Merat, Jamson, Lai & Carsten (2012)

In *Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State* beschreiben Merat et al. (2012) den Einfluss einer Sekundäraufgabe auf die Qualität der Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer hochautomatisierten Fahrt. Das Ziel der Studie war der Vergleich der Reaktionszeit sowie des Situationsbewusstseins in Abhängigkeit von Unterschieden im induzierten Workload während einer manuellen und einer automatisierten Fahrt. Unterschiedliche Stufen des Workloads wurden in der Studie durch eine Sekundäraufgabe induziert sowie durch einen Vorfall auf der Fahrspur, der die Teilnehmer dazu zwang, die Fahrspur zu wechseln. Die Sekundäraufgabe bestand aus dem Erraten von Objekten mithilfe von Fragen, die vom Versuchsleiter entweder mit Ja oder Nein beantwortet wurden.

Das Experiment wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit $N = 50$ Teilnehmern im Alter von 28 bis 68 Jahren durchgeführt ($M = 47.38$, $SD = 10.37$). Die simulierten Szenarien fanden auf einer dreispurigen Hochgeschwindigkeitsstraße statt („U.K. motorway“; Linksverkehr; ca. 110 km/h; einige andere Fahrzeuge; kein Stau). Während der Fahrt wurde Workload in 4 Stufen induziert: „Low“, freies Fahren, keine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern; „Medium 1“, Hinweisschild zu einem kritischen Vorfall, das zu einem Spurwechsel aufforderte; „Medium 2“, freies Fahren in Kombination mit der Sekundäraufgabe; „High“, Kombination aus den beiden Stufen des mittleren Workloads, Aufmerksamkeitsressourcen mussten zwischen komplexer Fahraufgabe und Nebenaufgabe aufgeteilt werden.

Der Versuch wurde als vollständige Messwiederholung mit den Faktoren „Fahrzeugautomation“ und „Leistung in der Nebenaufgabe“ realisiert. Als Maß für die Reaktionszeit wurde die Dauer zwischen dem Erscheinen des Hinweisschildes für den Spurwechsel und dem vollständigen Abschließen des Spurwechsels berechnet. Die Autoren berichten die durchschnittliche Zeit, die für den Spurwechsel benötigt wurde, als ungefähr 30 Sekunden, unabhängig von der Stufe des Workloads. Zusätzliche Ergebnisse beziehen sich auf die Veränderung der Geschwindigkeit, mit der sich die Versuchsteilnehmer dem kritischen Vorfall nähern. Die Autoren berichten eine signifikante Veränderung der Geschwindigkeit zwischen der Versuchsbedingung in der automatisiert ohne Nebenaufgabe gefahren wurde und der Bedingung in der automatisiert gefahren und gleichzeitig die Nebenaufgabe bearbeitet wurde. Merat et al. (2012) attribuieren diese Veränderung zu einem besseren Situationsbewusstsein der Probanden in Abwesenheit der Nebenaufgabe.

Die Studie von Merat et al. (2012) lässt nur sehr begrenzt auf eine realistische Reaktionszeit nach einer Übernahmeaufforderung schließen. Von den Probanden in der Studie wurde eine dauerhafte Überwachung auch in der automatisierten Bedingung erwartet und die Nebenaufgabe erforderte keine visuelle oder motorische Abwendung von der Fahraufgabe. Die vergleichsweise sehr hohe berichtete Reaktionszeit von 30 Sekunden ergibt sich möglicherweise aus der Definition des Kriteriums für eine solche Reaktionszeit, bzw. aus dem simulierten Szenario. Aus der Veröffentlichung wird nicht deutlich, was genau als ein abgeschlossener Spurwechsel definiert wurde und welcher Abstand zwischen der Aufforderung zum Spurwechsel und dem Beginn der gesperrten Spur lag. Die Studie liefert allerdings Hinweise darauf, dass kognitiv beanspruchte Fahrer selbst durch einfache sprachliche Aufgaben so stark abgelenkt sein können, dass die Qualität der Übernahme aus einer hochautomatisierten Fahrt zu verringert wird. Außerdem sind die gemessenen 30 Sekunden möglicherweise zwar nicht als Hinweis auf eine sichere Zeit für die Übernahme zu

verstehen, aber als Hinweis auf eine Zeitspanne, die ein Fahrer sich in einer unkritischen Situation nimmt, um komfortabel die Spur zu wechseln.

3.2.5. Damböck (2013)

In der Dissertation zum Thema *Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme* untersucht Damböck (2013) die Auswirkungen eines Fahrers „out-of-the-loop“ auf das Fahrerverhalten in einer Übernahmesituation. Die durchgeführte Studie wurde in großen Teilen bereits in Damböck et al. (2012) veröffentlicht. Die Dissertation liefert jedoch zusätzliche Hinweise auf die Dauer von einzelnen Abschnitten des Übernahmeprozesses. Abbildung 4 weist darauf hin, dass die rein motorischen und visuellen Komponenten des Prozesses unabhängig von der Komplexität der Situation sind (~2.4 – 2.6 Sekunden bis zum Blick auf die Straße und für Hände am Lenkrad). Eine Verlängerung der Zeit (3 – 6 Sekunden, siehe Abbildung 6) ergibt sich erst bei Einleitung und Durchführung der Handlung, die in der jeweiligen Situation erforderlich ist, was auch durch die Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Zeiten deutlich wird. In Abbildung 6 sind die Übernahmezeiten in Abhängigkeit von der zur Verfügung gestellten Zeit sowie in Abhängigkeit von der Art des verwendeten Szenarios dargestellt. Es scheint also für die Gestaltung von Experimenten, die eine realistische Übernahmezeit liefern, essentiell zu sein, dass komplexe Szenarien berücksichtigt werden und dass ein Maß für die Bewältigung, bzw. für den erfolgreichen Abschluss des Szenarios gefunden wird.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen Zeitdauern für die einzelnen Übernahmephasen. Die Berechnung basiert auf der Handlungsablaufanalyse des Übernahmevorgangs. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 142.

Phase	Berechnung	Messung
Reaktion	0.5 s	0.5 s
Blickzuwendung	0.8-1.0 s	1.1 s
Hands-On	2.0-2.2 s	2.4-2.6 s
Übernahme	3.1-3.5 s	3-6 s

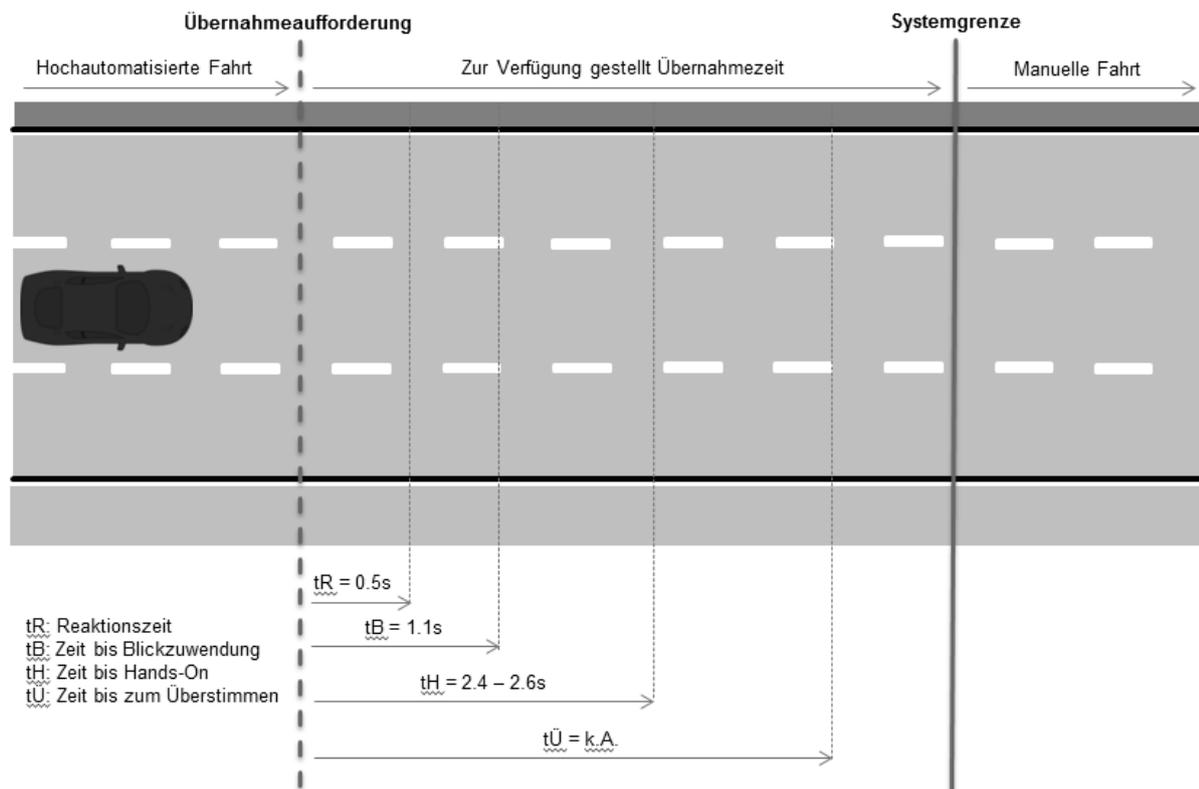


Abbildung 4: Einzelphasen des Übernahmeprozesses und deren Dauer, von der Übernahmemaufforderung bis zur Übernahme der Fahraufgabe. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 137.

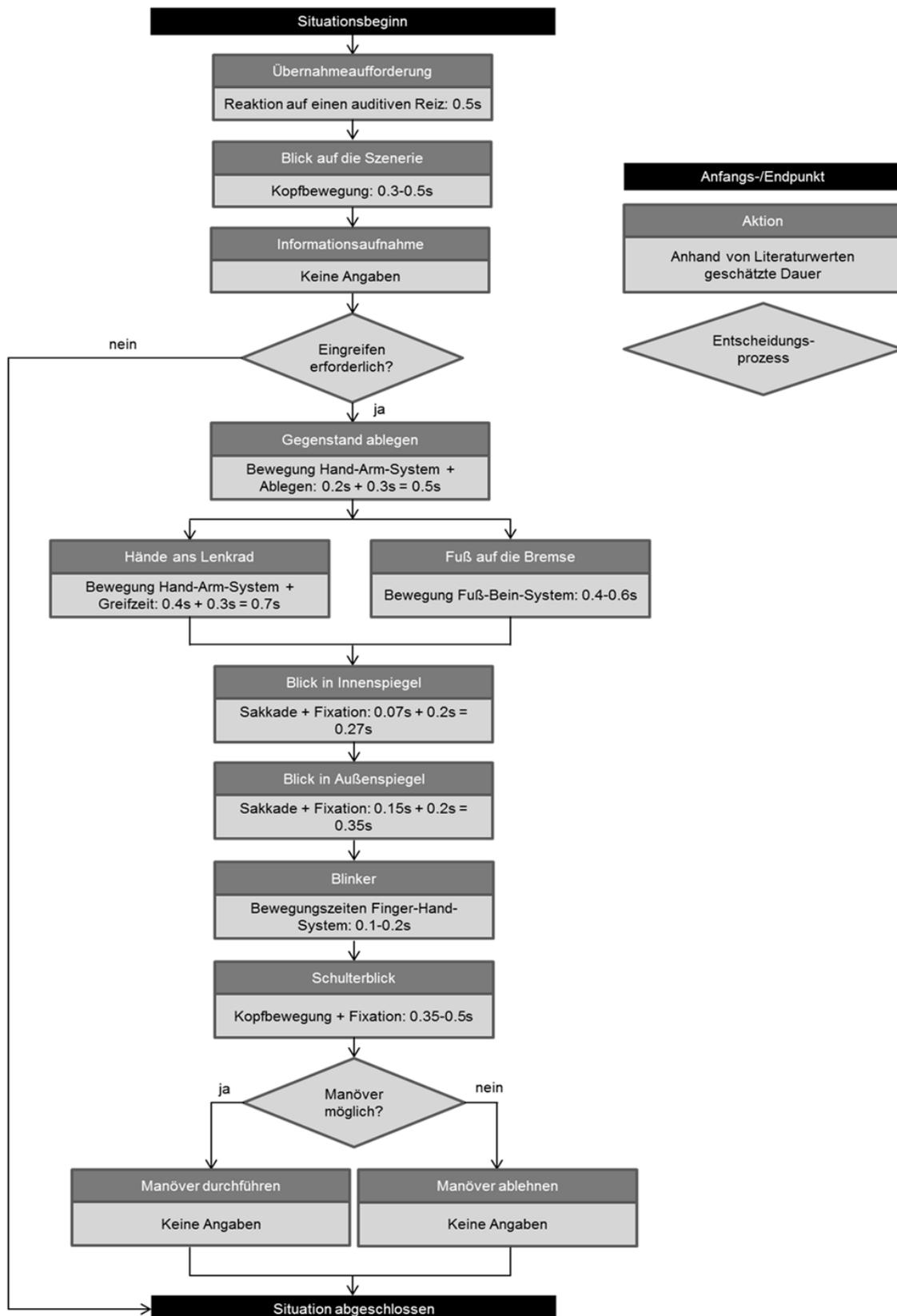


Abbildung 5: Ablaufanalyse des Übernahmeprogangs unter Berücksichtigung von Literaturwerten für Reizverarbeitung, motorische Umsetzung und Orientierung. Modifiziert nach Damböck (2013), S. 113.

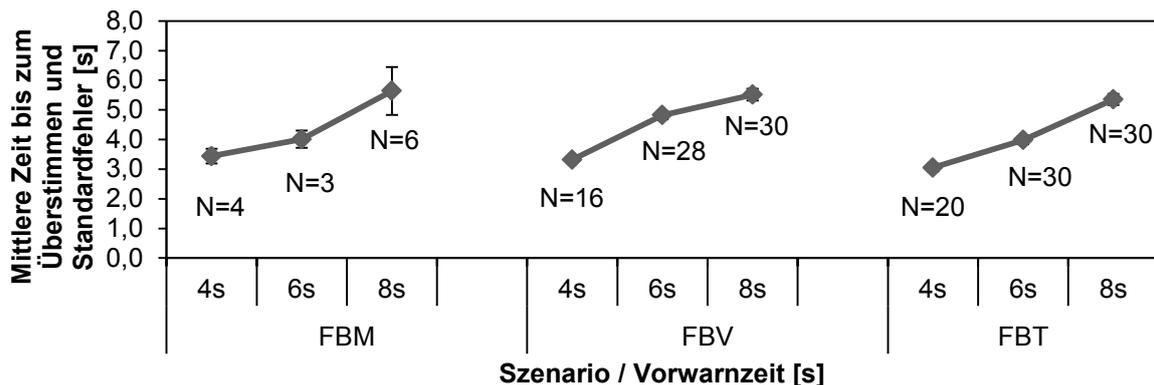


Abbildung 6: Mittlere Zeit von der Übernahmeaufforderung bis zur Deaktivierung des Systems (vollständige Übernahme der Fahraufgabe). Darstellung in Abhängigkeit des gefahrenen Szenarios und der zur Verfügung gestellten Vorwarnzeit (FBM: Fahrbahnmarkierung fehlt; FBV: Fahrstreifenwechsel auf die Nebenspur; FBT: Fahrstreifenwechsel in eine von einem Straßenschild vorgegebene Richtung). Modifiziert nach Damböck (2013), S. 136.

3.2.6. Gold, Damböck, Bengler & Lorenz (2013)

In der Studie *Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation* von Gold et al. (2013a) wird die Möglichkeit untersucht, Fahrer aus einer hochautomatisierten Fahrt zunächst in eine niedrigere Stufe der Automation zu überführen, um schnellere und qualitativ bessere Reaktionen zu erhalten als bei der direkten Transition zu einer manuellen Steuerung. Über den Austausch der Übernahmeaufforderung durch eine Aufforderung zur Überwachung des Fahrzeugs wurde eine Verbesserung des Komforts und der Zufriedenheit der Fahrer erwartet.

Der Versuch wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit $N = 48$ Teilnehmern durchgeführt. Die Versuchsteilnehmer waren unterteilt in eine Treatment-Gruppe ($N = 32$, im Alter von 19 – 57 Jahren, $M = 27.6$, $SD = 8.7$, 25% weiblich) und eine Baseline-Gruppe ($N = 16$, im Alter von 20 – 55 Jahren, $M = 28.5$, $SD = 10.0$, 25% weiblich). Die simulierten Szenarien fanden auf einer dreispurigen Autobahn mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h statt. Es wurden sechs Szenarien implementiert, von denen sich zwei Szenarien kritisch entwickelten, sodass ein Eingreifen der Versuchspersonen erforderlich wurde. Die folgenden Situationen wurden im Simulator umgesetzt:

- „Person“: Auf dem Seitenstreifen stand ein Pannenfahrzeug. Vor dem Fahrzeug stand eine Person. Das Fahrzeug wurde sechs Sekunden vor dem Erreichen durch das Ego-Fahrzeug sichtbar. Zeitgleich wurde der Fahrer zur Überwachung der Situation aufgefordert. Vier Sekunden vor dem Erreichen des Fahrzeugs begann die Person auf die Fahrbahn zu gehen, sodass die Probanden gezwungen waren entweder zu bremsen oder auf eine andere Fahrspur auszuweichen.
- „Road Construction“: Auf dem Seitenstreifen war eine Baustelle. Sechs Sekunden vor dem Erreichen der Baustelle wurde der Fahrer zur Überwachung der Situation aufgefordert. Analog zu dem Szenario „Person“ wurde die Situation kritisch, wenn ein Kompressor bei einem Zeitabstand von vier Sekunden mit der gleichen Trajektorie und Geschwindigkeit wie die Person auf die Straße rollte.
- „Uncritical Situations“: Vier unkritische Situationen waren vom Aufbau ähnlich zu den Situationen „Person“ und „Road Construction“, entwickelten sich aber nicht kritisch.

Zwar wurde auch hier der Fahrer sechs Sekunden vor dem Erreichen der Situation zur Überwachung aufgefordert, eine Intervention des Fahrers war in diesen Situationen jedoch nicht notwendig.

Während der Fahrt wurde den Probanden außerdem eine Nebenaufgabe präsentiert (Surrogate Reference Task (SuRT), ISO/TS 14198), die sie jeweils in einem Intervall von einer Minute für eine Zeitspanne von etwa einer Minute bearbeiten sollten. Die Aufgabe wurde abwechselnd auf einem Tablet-Computer und in der Mittelkonsole dargeboten.

Reaktionszeiten wurden analog zu Damböck (2013) anhand von Blickbewegungsparametern (Gaze Reaction, Road Fixation, Side Mirror) und Handlungsparametern (Hands On Steering Wheel, Intervention, Application of Turn Signal) operationalisiert. Das Experiment wurde als Messwiederholung umgesetzt. Eine zusätzliche Variable war eine unterschiedliche Umsetzung der Aufforderung zur Überwachung (Baseline; Aufforderung zu rein visueller Überwachung; Aufforderung zu rein motorischer Überwachung; Aufforderung zu visueller und motorischer Überwachung). Die visuell überwachenden Probanden griffen im Durchschnitt nach $M = 4.24$ ($SD = 0.64$) Sekunden ein. Die motorisch überwachenden Probanden griffen bereits nach $M = 3.94$ ($SD = 0.68$) Sekunden ein (siehe Abbildung 7). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant. Zusätzlich wurde berichtet, dass mehr Probanden aus der rein visuell überwachenden Gruppe gar nicht in die Situation eingriffen (30%), als aus der motorisch überwachenden Gruppe (10%). In der Baseline-Gruppe reagierten alle Versuchspersonen mit einem Spurwechsel.

Gold et al. (2013a) schließen aus den Ergebnissen, dass ein Hinweis zur Überwachung des Systems, der nicht in jedem Fall zu einem notwendigen Eingriff führt, Automationseffekte nur teilweise verringern kann. Insgesamt griffen die Probanden etwas früher in die Situation ein, allerdings muss für eine Überwachungs-Phase von zwei Sekunden auch eine zusätzliche Sensor-Reichweite von zwei Sekunden zur Verfügung gestellt werden.

Die Studie von Gold et al. (2013a) testete eine Methode, um die Reaktionszeit im Fall einer Übernahmeaufforderung zu verbessern. Hierbei konnten nur ansatzweise Erfolge erzielt werden, was den Forschungsbedarf in diesem Bereich verdeutlicht. Weiterhin kann die Studie als Hinweis auf einen relativ konstanten Minimalbereich für Übernahmezeiten im Bereich von vier Sekunden interpretiert werden, der derzeit auch durch Optimierung der Warnstrategien nur schwer zu unterschreiten scheint.

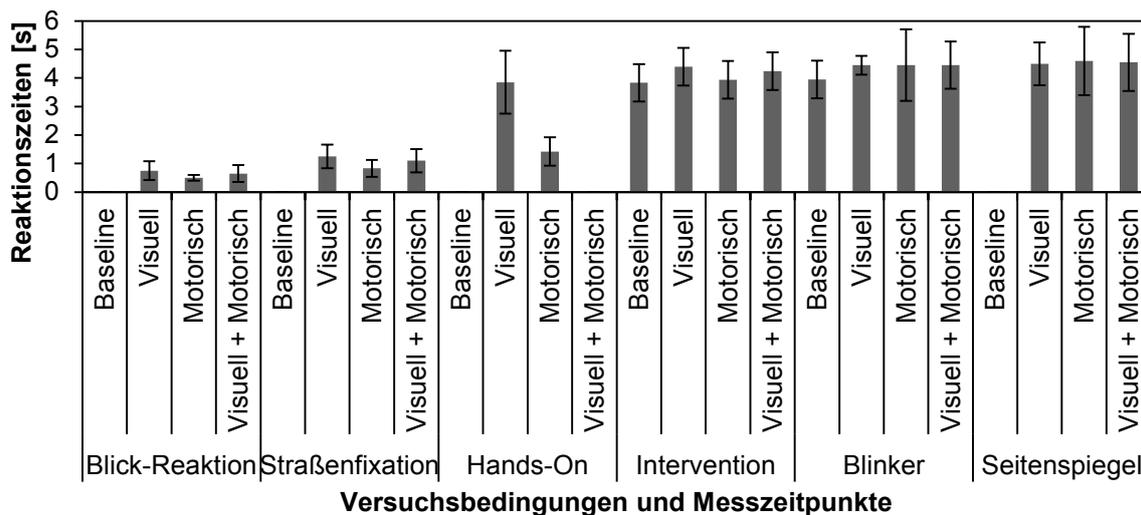


Abbildung 7: Reaktionszeiten der unterschiedlichen Versuchsgruppen. Modifiziert nach Gold et al. (2013a), S. 4.

3.2.7. Gold, Damböck, Lorenz & Bengler (2013)

In der Studie „Take over!“ *How long does it take to get the driver back into the loop?* von Gold et al. (2013b) liegt der Fokus auf dem Vergleich von zwei von der Automation zur Verfügung gestellten Übernahmezeiten in einem hochautomatisierten Szenario mit der Leistung der Probanden in einer manuellen Fahrt. Die Probanden wurden hierbei über eine Nebenaufgabe auf einem Tablet-Computer out-of-the-loop genommen.

Der Versuch wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit $N = 45$ Versuchspersonen durchgeführt, die in eine hochautomatisierte Gruppe ($N = 32$, zwischen 19 und 57 Jahren, $M = 27.6$, $SD = 8.7$), und eine nicht-automatisierte Referenzgruppe ($N = 13$, zwischen 20 und 43 Jahren, $M = 27.4$, $SD = 7.7$) unterteilt waren. Die simulierte Fahrumgebung war eine dreispurige Straße mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h. In der automatisierten Fahrbedingung wurde eine Unfallstelle auf dem rechten Fahrstreifen implementiert, der die Probanden entweder durch eine Notbremsung oder durch einen Spurwechsel ausweichen mussten. Die Spuren neben dem Egofahrzeug waren in dieser Situation frei. Ob grundsätzlich umgebender Verkehr simuliert wurde, ist aus der Veröffentlichung nicht ersichtlich.

Als Nebenaufgabe wurde der Surrogate Reference Task (SuRT; ISO/TS 14198) um einen Punktestand erweitert, auf dem die Probanden ihre Leistung mit anderen Probanden vergleichen konnten. Die Nebenaufgabe wurde jeweils einmal pro Minute für eine Dauer von 30 Sekunden präsentiert. Die Hälfte der Stichprobe bearbeitete die Aufgabe auf einem Tablet-Computer, die andere Hälfte auf einem Bildschirm in der Mittelkonsole. Das Experiment wurde mit zwei unabhängigen Gruppen durchgeführt, wobei die Hälfte der Versuchspersonen eine Übernahmeaufforderung mit einer time to collision (TTC) von 5 Sekunden präsentiert bekamen. Der anderen Hälfte der Versuchspersonen wurde die Übernahmeaufforderung bei einer TTC von 7 Sekunden präsentiert. In der Baseline-Bedingung wurden die Zeiten äquivalent als Zeit, zu der die Unfallstelle sichtbar wurde, implementiert (umgesetzt als Spurwechsel eines Lead-Fahrzeugs, das die Unfallstelle

verdeckt). In den Treatment-Bedingungen wurde die Übernahmeaufforderung als ein akustischer Warnton umgesetzt.

Analog zu Gold et al. (2013a) wurden in in der Studie von Gold et al. (2013b) eine Reihe von Zeitpunkten definiert, die die Autoren als unterschiedliche Phasen der Übernahme charakterisieren. Konkret wurden in dieser Studie die Zeitpunkte *gaze reaction*, *road fixation*, *hands on*, *intervention*, *side mirror*, und *turn signal* betrachtet. Der Zeitpunkt *intervention* wurde konkret definiert als eine Veränderung des Lenkradwinkels um mindestens 2 Grad oder eine Veränderung der Bremspedalstellung um mindestens 10%. Für eine Übernahmezeit von 5 Sekunden wurde eine Bremsreaktion entsprechend nach $M = 2.06$ ($SD = 0.34$) Sekunden, und eine Lenkreaktion nach $M = 2.27$ ($SD = 0.66$) Sekunden registriert. Für eine Übernahmezeit von 7 Sekunden wurde eine Bremsreaktion nach $M = 3.10$ ($SD = 0.66$) Sekunden, eine Lenkreaktion nach $M = 3.65$ ($SD = 1.33$) Sekunden registriert (siehe Abbildung 8). Zusätzlich wurden in der Studie die Fahrdaten und Trajektorien der Probanden in den automatisierten Bedingungen mit der Baseline-Bedingung verglichen, wobei sich signifikante Unterschiede hinsichtlich einer Verschlechterung dieser Werte in beiden Treatment-Bedingungen im Vergleich zur Baseline zeigten.

Die Autoren interpretieren die Ergebnisse hinsichtlich einer Verlängerung der Reaktionszeit als Reaktion auf eine längere zur Verfügung gestellte Übernahmezeit. Probanden nutzten die längere zur Verfügung gestellt Übernahmezeit für eine Verbesserung der gefahrenen Trajektorien, sowie eine Vergrößerung des Sicherheitsabstandes. Sowohl 5 als auch 7 Sekunden scheinen in diesem Szenario noch nicht ausreichend zu sein, um eine kontrollierte, mit einer Baseline vergleichbare Reaktion zu erreichen. Fahrer scheinen unter diesen Bedingungen das Absichern des Spurwechsels zu vernachlässigen und Spurwechsel mit erhöhten Beschleunigungswerten durchzuführen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass mit einer kürzeren zur Verfügung gestellten Übernahmezeit zwar auch kürzere Reaktionszeiten erreicht werden, die Qualität der Übernahme aber insgesamt schlechter ist. Zusammenfassend urteilen die Autoren:

„Under these experimental conditions, with a complete distraction of the driver, automation effects are still observable with a 7s TOR-time [Take Over Reaction-time].“ (Gold et al., 2013b, S. 1942).

In der Studie von Gold et al. (2013b) wird der Unterschied zwischen einer minimalen Zeit deutlich, die für eine motorische Reaktion ausreichend ist, und einer Zeit, die eine komfortable und abgesicherte Übernahme möglich macht. Während die Intervention in der Studie in der kritischeren Situation (5 Sekunden TTC) bereits nach durchschnittlichen 2.27 Sekunden stattfand, fanden sich auch bei einer TTC von 7 Sekunden noch deutliche Unterschiede in der Übernahmequalität im Vergleich zu einer manuell gefahrenen Baseline. Es scheint also wichtig zu sein, für die Messung einer sicheren Übernahmezeit nicht nur reaktionsbezogene Parameter zu berücksichtigen, sondern auch das Fahrerverhalten während und nach der Übernahme zu betrachten, um ein Urteil über die Qualität der Übernahme zu erhalten. Kritisch zu betrachten ist in dieser Studie die relativ junge Stichprobe, die zu der vergleichsweise schnellen initialen Reaktion auf die Übernahmeaufforderung beigetragen haben könnte.

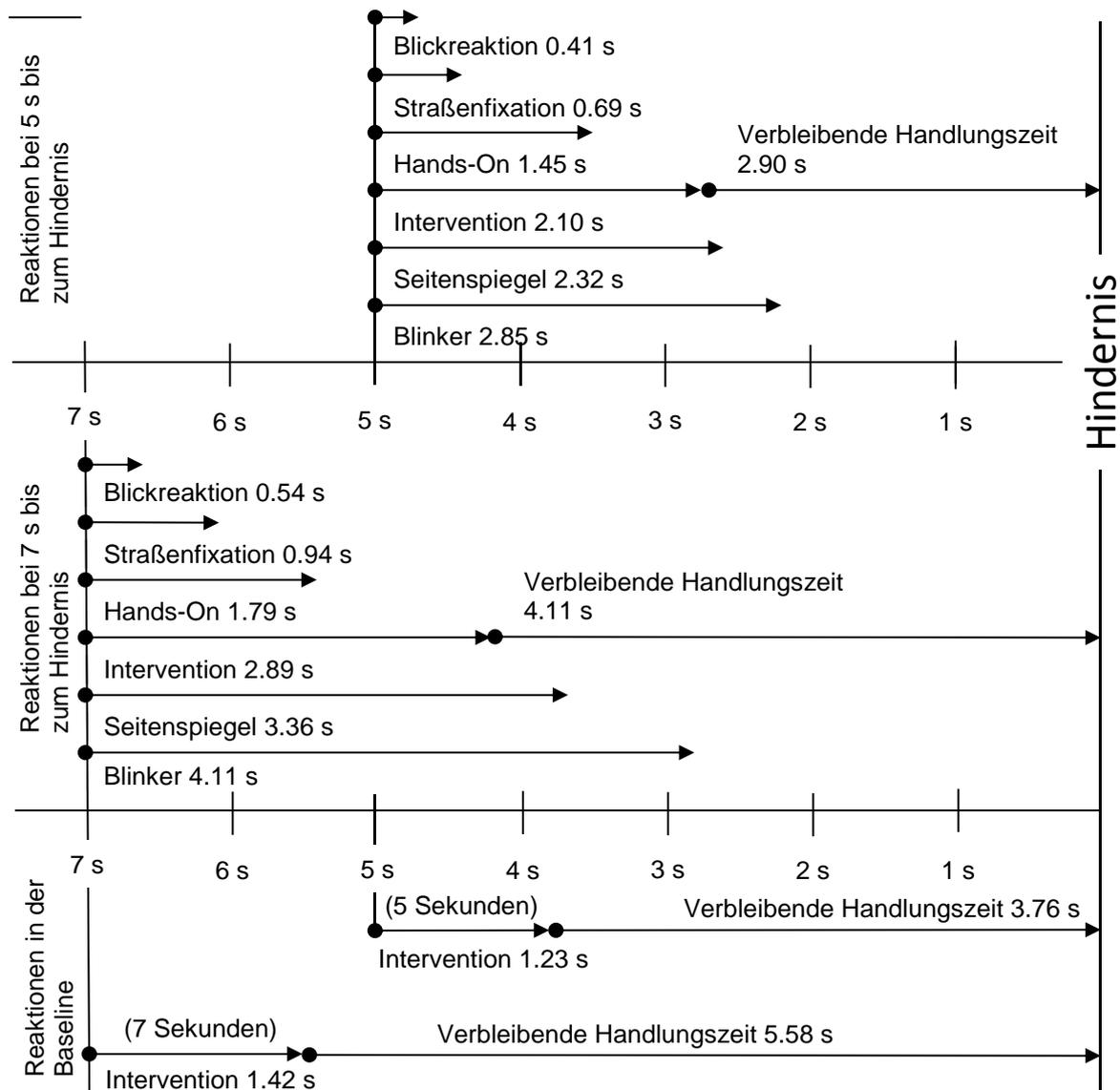


Abbildung 8: Reaktions-Prozeduren. Modifiziert nach Gold et al. (2013b), S. 1940.

3.2.8. Helldin, Falkman, Riveiro & Davidsson (2013)

Die Studie *Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving* von Helldin et al. (2013) untersucht den Einfluss eines HMIs, das die Wahrscheinlichkeit des Erreichens einer Systemgrenze für den Fahrer eines hochautomatisierten Fahrzeugs grafisch darstellt. Die Autoren argumentieren, dass die Fähigkeiten einer Automation besser an den Fahrer kommuniziert werden müssen, um im Falle einer Übernahmeaufforderung ein höheres Situationsbewusstsein des Fahrers sicher zu stellen.

Für die Studie wurden $N = 59$ Teilnehmer (28 weiblich) im Alter von 21 bis 60 Jahren ($M = 41.2$) rekrutiert. Die Studie fand in einem statischen Fahrsimulator statt. 30 Teilnehmer wurden der Gruppe zugeordnet, die während der Fahrt Informationen über das Unsicherheits-Level der Automation bekamen, 29 Teilnehmer waren einer Kontrollgruppe zugeteilt, die keine Informationen bekam. Es wurde ein HMI gestaltet, das das Unsicherheits-

Level der Automation auf einer Skala von 7 (keinerlei Unsicherheit, Automation voll funktionsfähig) bis 1 (sehr hohe Unsicherheit, Automation funktioniert nicht mehr) kommunizierte. Ab einem Unsicherheits-Level von 2 wurde die Funktionstüchtigkeit der Automation nicht mehr garantiert.

Das simulierte Szenario war eine verschneite Landstraße mit jeweils einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Während der automatisierten Fahrt wurde Schneefall simuliert. Die Probanden wurden informiert, dass das Fahrzeug ohne Fehler automatisiert fährt, die Fähigkeit hierfür allerdings an die Wetterbedingungen gekoppelt ist. Den Probanden wurden außerdem Zeitungen und Süßigkeiten auf dem Beifahrersitz zur Verfügung gestellt, und es stand ihnen frei, zu lesen oder zu essen. Die Intensität des Schneefalls wurde über den Verlauf der simulierten Strecke variiert. Wenn 100% Intensität des Schneefalls erreicht war, konnte die Automation die Längs- und Querführung nicht länger übernehmen und schaltete sich ab. Dies wurde angezeigt durch das Wechseln der Unsicherheits-Anzeige auf Stufe 1. Die Übernahme wurde immer in einer leichten Kurve initiiert.

Die Übernahmezeit wurde berechnet als Zeitraum zwischen dem Maximum der Schneefall-Intensität und einer Reaktion der Versuchsteilnehmer an der Lenkung oder der Bremse. Während in der Kontrollgruppe im Durchschnitt $M = 3.2$ Sekunden verstrichen bis die Probanden die Kontrolle übernahmen, benötigten die Probanden in der Gruppe mit der Unsicherheits-Information im Durchschnitt signifikant unterschiedliche $M = 1.9$ Sekunden⁴. Helldin et al. (2013) berichten weiterhin, dass während der Experimentalbedingung signifikant seltener auf die Straße geschaut wurde.

Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass ein HMI, das dem Fahrer Informationen über das Unsicherheits-Level der Automation zur Verfügung stellt, dazu beitragen kann, eine bessere Leistung in Übernahme-situationen zu induzieren. Die gleichzeitig größere Häufigkeit der Blickabwendungen wird als eine bessere Kalibrierung des Vertrauens in die Automation interpretiert.

Helldin et al. (2013) liefern Hinweise für die Nützlichkeit einer Anzeige der System-Unsicherheit einer Automation. Der Ansatz ist vergleichbar mit der Manipulation der Vorhersagbarkeit einer Übernahme in einem Stau-Szenario bei Dogan et al. (2014). Die gefundenen durchschnittlichen Übernahmezeiten zwischen ca. 2 bis 3 Sekunden liegen für eine Übernahme der manuellen Steuerung aus einer Situation, in der die Automation zumindest teilweise von den Probanden überwacht wurde, in einem mit anderen Studien vergleichbaren Bereich (z.B. Strand et al., 2014; Radlmayr et al., 2014). Interessant wäre nun der Test einer solchen Unsicherheits-Anzeige in einem Automations-Konzept, das keine dauerhafte Überwachung durch den Fahrer voraus setzt. Auch eine Kombination mit mehrstufigen Automations-Konzepten, in denen eine niedrigere Stufe der Automation als Rückfall-Ebene für eine durch hohe Unsicherheit charakterisierte Fahrsituation dient (z.B. Gold et al., 2013a) könnte hier sinnvoll sein, und Vorteile hinsichtlich Übernahmezeit und Übernahmegüte bieten.

⁴ Zu den durchschnittlichen Reaktionszeiten wurden in Helldin et al. (2015) Standardabweichungen nur grafisch berichtet und können daher hier nicht genau wieder gegeben werden.

3.2.9. Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr & Mergl (2013)

In der Studie *Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt* von Petermann-Stock et al. (2013) stehen die Übernahmezeiten in Abhängigkeit von der Komplexität der Nebenaufgabe im Fokus. In der Studie wurden zunächst anhand eines Expertenratings mögliche realistische Nebenaufgaben erhoben und anschließend hinsichtlich der Faktoren „Interner Anreiz“ und „Externe Kontrolle“ klassifiziert. Auf dieser Grundlage wurden anschließend drei Nebenaufgaben definiert, die sich in ihrem Beanspruchungslevel sowie der Art der Beanspruchung unterschieden. Alle definierten Nebenaufgaben basierten auf einem Wissensquiz mit 70 Fragen zu Allgemeinwissen, Redewendungen, sowie zu Rechtschreibung und Grammatik:

- „low“: Der Versuchsleiter liest die Fragen vor, der Proband beantwortet die Fragen sprachlich, der Versuchsleiter liest die korrekte Antwort vor (Art der Beanspruchung: akustisch (+kognitiv))
 - „mid“: Der Versuchsleiter liest die Fragen vor, der Proband beantwortet die Fragen sprachlich, der Proband liest die korrekten Antworten auf einem Bildschirm (Art der Beanspruchung: akustisch und visuell (+kognitiv))
 - „high“: Der Versuchsleiter liest die Fragen vor, der Proband beantwortet die Fragen über das Eintippen der Antwort auf einem Laptop, der Proband liest die korrekten Antworten auf einem Bildschirm (Art der Beanspruchung: akustisch, visuell und motorisch (+kognitiv))
- (Vgl. Petermann-Stock et al., 2013, Tabelle 2)

Der Versuch fand in einem statischen Fahrsimulator mit N = 72 Probanden statt, die in zwei Altersgruppen unterteilt waren. Jüngere Probanden waren N = 36 Personen (M = 34, SD = 3 Jahre alt, 13 Frauen), während die ältere Stichprobe aus N = 34 (M = 60, SD = 5 Jahre alt, 4 Frauen) Personen bestand.

Für das simulierte Szenario wurde eine zweispure Autobahn mit leichten Kurven und einer Richtgeschwindigkeit von 130 km/h implementiert. Für den Moment der Übernahmeaufforderung wurde ein Stau-Szenario mit zäh fließendem Verkehr simuliert, in dem die Automation bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h die Quer- und Längsführung vollständig übernahm. Die Übernahmeaufforderung erfolgte bei einer Geschwindigkeit von 35 km/h. Ab dem Zeitpunkt der Aufforderung zur Übernahme wurde die Automation innerhalb von einer Sekunde graduell beendet. Die Übernahmeaufforderung fand immer innerhalb eines Übergangsbogens auf der Strecke und hinter einem stark abbremsenden Führungsfahrzeug statt und erforderte somit keinen sofortigen Eingriff des Fahrers. Das Szenario erzwang allerdings eine Reaktion, wenn eine Kollision mit dem Führungsfahrzeug vermieden werden sollte. Die Übernahmeaufforderung war als eine Kombination aus einem Signalton und einer visuellen Aufforderung auf einem Display hinter dem Lenkrad realisiert.

Der Versuch wurde als 3-faktorielles gemischtes Design mit den Faktoren *Altersgruppe* (zwei Stufen, between), *Nebenaufgabe* (3 Stufen, between), und *Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung* (2 Stufen, within) geplant. Die Reaktionszeit für eine Übernahme wurde in dem Versuch definiert als die Zeit zwischen der Übernahmeaufforderung und der ersten Betätigung des Fahr- oder Bremspedals sowie als die Zeit zwischen der Übernahmeaufforderung und dem Zeitpunkt, zu dem der Betrag der Lenkradwinkelgeschwindigkeit $> 4^\circ/\text{Sekunde}$ war sowie das Lenkradmoment und der

Lenkradwinkel ein unterschiedliches Vorzeichen aufweisen. Aus dem Versuch ergaben sich für die Art der Nebenaufgabe signifikante Unterschiede mit mittleren Reaktionszeiten von $M = 2.03$ ($SD = 0.68$) Sekunden für „low“, $M = 2.90$ ($SD = 1.33$) Sekunden für „mid“, und $M = 3.35$ ($SD = 1.60$) Sekunden für „high“ (siehe Abbildung 9). Ebenso zeigte sich ein signifikanter Effekt für den Faktor *Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung*, mit einer Verbesserung der Reaktionszeit von ca. einer Sekunde bei der zweiten Übernahmeaufforderung im Vergleich zur ersten. Der Faktor Altersgruppe hatte keinen signifikanten Effekt. Eine maximale Reaktionszeit von 8.8 Sekunden wurde für die erste Übernahmeaufforderung in der Nebenaufgabenbedingung „mid“ gemessen. Die Autoren berichten zudem, dass sich 76% der Probanden eine frühere Ankündigung einer bevorstehenden Übergabe durch das System, im Vergleich zu der Übernahmeaufforderung im Versuch wünschen. Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass eine Automation nach einer Übernahmeaufforderung noch mindestens für einen Zeitraum von 5 Sekunden und maximal für einen Zeitraum von 10 Sekunden die Fahraufgabe übernehmen sollte. Für einen komfortablen Zeitraum, im Vergleich zu einem sicheren Zeitraum, wird eine Übernahmezeit von mindestens 8 – 10 Sekunden vermutet. Petermann-Stock et al. (2013) sehen zudem den Fokus zukünftiger Forschung auch auf dem Zeitraum nach der motorischen Übernahme, in dem noch zu definieren ist, wann ein Fahrer die Fahraufgabe wieder so vollständig übernommen hat, dass er auch in nachfolgenden kritischen Situationen adäquate Handlungsentscheidungen treffen kann.

Die Studie von Petermann-Stock et al. (2013) betrachtet einen geringeren Geschwindigkeitsbereich, was sich im Kontext der Übergabe von automatisiertem Fahren zu manueller Steuerung direkt auf die Zeit auswirkt, die ein Sensorsystem in der Lage ist, für eine Übergabe zur Verfügung zu stellen. Die Ergebnisse für die Reaktionszeit auf eine

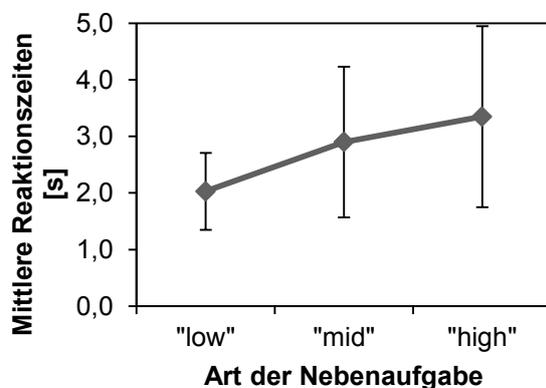


Abbildung 9: Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Art der Nebenaufgabe. Modifiziert nach Petermann-Stock et al. (2013), S. 17.

Übernahmeaufforderung sind allerdings in einem ähnlichen Bereich wie Studien zu höheren Geschwindigkeitsbereichen. Unterschiede zeigen sich methodisch in dieser Studie vor allem in der Implementierung der Fähigkeiten der Automation.

Es wurden in diesem Fall keine spezifischen Zeiträume für die Übernahme zur Verfügung gestellt und anschließend verglichen, sondern eine Übernahme in Abhängigkeit einer Reaktion auf ein bremsendes Führungsfahrzeug ausgelöst. Die Zeit, die bei einer ausbleibenden Reaktion zu einer Kollision mit dem Führungsfahrzeug geführt hätte bzw. die Anzahl der Kollisionen mit dem Führungsfahrzeug wurden in der Veröffentlichung nicht berichtet. Nach Gold et al. (2013b) ist zu vermuten, dass die Länge der zur Verfügung

stehenden Zeit bis zu einem kritischen Event einen Einfluss auf die Reaktionszeit der Probanden im Fahrsimulator hat. Im Hinblick auf diese Vermutung ist eine Abhängigkeit der ermittelten Übernahmezeiten in Petermann-Stock et al. (2013) von der TTC im simulierten Übernahmeszenario nicht auszuschließen. Wichtige Hinweise liefern die Autoren auch zu der Betrachtung der Zeit nach einer Übernahme, in der nachhaltige Effekte auf das Fahrerverhalten für einen noch zu bestimmenden Zeitraum vermutet werden.

3.2.10. Wulf, Zeeb, Rimini-Döring, Arnon & Gauterin (2013)

In der Studie *Effects of Human-Machine Interaction Mechanisms on Situation Awareness in Partly Automated Driving* von Wulf et al. (2013) wurde ein Zusammenhang zwischen dem Situationsbewusstsein während einer automatisierten Fahrt und der Reaktionszeit bei der Übernahme von einer automatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung hergestellt. Zur Verbesserung des Situationsbewusstseins wurden zwei Human-Machine-Interface (HMI) Konzepte unter verschiedenen Bedingungen in einem Stau-Szenario gegeneinander getestet.

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator mit $N = 90$ Probanden im Alter von 18 bis 60 Jahre ($M = 36.40$, $SD = 9.08$ Jahre) durchgeführt. Es wurden verschiedene Stau-Szenarien simuliert. Die Probanden waren gleichmäßig auf vier Versuchsbedingungen verteilt: *Baseline* (keine Nebenaufgabe, kein HMI); *Secondary Task* (Nebenaufgabe, kein HMI); *Driver Safety Device* (Nebenaufgabe, HMI-Konzept Driver Safety Device); *Video Image* (Nebenaufgabe, HMI-Konzept Video Image). Die Nebenaufgabe bestand in der Navigation innerhalb einer Menüstruktur über einen Touchscreen. Das HMI-Konzept Driver Safety Device war angelehnt an den aus dem Zug-Bereich bekannten „Totmannschalter“ und verlangte alle 20 Sekunden eine Reaktion auf die Veränderung einer Anzeige (das Betätigen eines Schalters am Lenkrad). Das HMI-Konzept Video Image war realisiert als ein Bildschirm in visueller Nähe zu der Nebenaufgabe, der ein Bild des vorausfahrenden Verkehrs übertrug. Innerhalb der Simulation erlebten alle Probanden vier Übergabeszenarien: 1. Starkes Bremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs 2. Gefährlicher Spurwechsel eines Fahrzeugs auf der Nebenspur 3. Hindernis auf der rechten Fahrspur 4. Nicht-erkannter Fehler in der Querführung. Die bevorstehende Übernahme wurde in den Szenarien 1 und 3 durch einen akustischen Warnton angekündigt. In den beiden anderen Szenarien gab es keine Warnung.

Die berichteten Reaktionszeiten in Wulf et al. (2013) sind stark von der Art des Übergabeszenarios abhängig und scheinen nicht zwischen den Szenarien vergleichbar zu sein. Der Zeitpunkt, der für die Messung der Reaktionszeit definiert wurde, wird von den Autoren nicht berichtet. Für die Szenarien 1 und 2 wurden in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung Reaktionszeiten zwischen $M = 1.16$ ($SD = 0.30$) Sekunden (Baseline Szenario 1) und $M = 1.88$ ($SD = 0.84$) Sekunden (mit Nebenaufgabe, HMI-Konzept Video Image) erfasst. Für das Szenario 3 wurde die geringste mittlere Reaktionszeit von $M = 16.64$ ($SD = 3.67$) Sekunden für die Versuchsbedingung *Driver Safety Device* (mit Nebenaufgabe, HMI-Konzept Driver Safety Device), und die höchste mittlere Reaktionszeit von $M = 19.97$ ($SD = 4.47$) Sekunden für die Versuchsbedingung *Video Image* gemessen. In Szenario 4 lagen die mittleren Reaktionszeiten zwischen $M = 9.38$ ($SD = 1.12$) Sekunden für die Baseline, und $M = 10.82$ ($SD = 2.46$) Sekunden für die Versuchsbedingung *Video Image*.

Die Autoren diskutieren die Notwendigkeit von geeigneten HMI-Konzepten für die Verbesserung des Situationsbewusstseins während einer hochautomatisierten Fahrt. Sie schließen, dass das Konzept *Driver Safety Device* zu einer Verringerung der Reaktionszeiten auf eine Übernahmeaufforderung beitragen kann. Das Konzept *Video Image* scheint

hingegen keine oder sogar negative Effekte mit sich zu bringen, die unter anderem aus dem erhöhten Potenzial für Complacency zu stammen scheinen. Das Konzept *Driver Safety Device* veranlasste die Probanden in dem Versuch häufig dazu, die linke Hand am Lenkrad zu belassen, während sie mit der rechten Hand die Nebenaufgabe ausführten.

Die Studie von Wulf et al. (2013) schlägt HMI-Konzepte zur Verbesserung des Situationsbewusstseins in einem hochautomatisierten Stau-Szenario vor. Die minimale Verbesserung der Reaktionszeiten für das an den Totmannschalter angelehnte Konzept scheint in dieser Studie vorwiegend aus der veränderten Position der linken Hand zu entstehen. Die Studie verwendet eine Vielzahl von Kombinationen von Variablen, deren Effekte nur teilweise in dieser Veröffentlichung berichtet werden. Ein Rückschluss auf realistische Reaktionszeiten für eine Übernahme in einem Stau-Szenario ist daher nur schwer möglich, wobei auch die Definition der Kriterien für eine erfolgreiche Übernahme eine Rolle spielt. Deutlich wird dies vor allem in der breiten Spanne der berichteten mittleren Übernahmezeiten (1.16 Sekunden bis 19.97 Sekunden), die keinen direkten Schluss auf die Reaktionszeiten in anderen Szenarien, oder anderen HMI-Konfigurationen zulässt. Hinweise liefern die Autoren vor allem zu der Wichtigkeit des Situationsbewusstseins für eine schnellere, und qualitativ hochwertigere Übernahme von einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung. HMI-Konzepte, die es schaffen, das Situationsbewusstsein des Fahrers in einer solchen Situation aktiv aufzubauen und auch vorab zu unterstützen, haben das Potenzial, die Übernahme sicherer und komfortabler zu gestalten.

3.2.11. Brandenburg & Skottke (2014)

Die Studie *Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving?* von Brandenburg & Skottke (2014) adressiert das Fahrerverhalten nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt. In Merat et al. (2012) und Petermann-Stock et al. (2013) finden sich bereits Hinweise, dass auch nach dem Abschluss einer Übernahme von einer hochautomatisierten Fahrt zu manueller Steuerung Automationseffekte auftreten können. Entsprechend liegt der Fokus der Studie von Brandenburg & Skottke (2014) auf längerfristigen Effekten, die in einem Zeitraum auftreten, der außerhalb der bisher beobachteten maximal 10 Sekunden nach einer Übernahmeaufforderung liegt. Außerdem sollten die Probanden dem hochautomatisierten Fahren in dieser Studie für einen längeren Zeitraum ausgesetzt sein als den bisher maximal 9 Minuten in Petermann-Stock et al. (2013).

Diese Studie entspricht nicht den vorab aufgestellten Review-Kriterien, da keine Reaktionszeiten berichtet wurden und die Probanden in der Phase der hochautomatisierten Fahrt instruiert waren, ihre Hände am Lenkrad zu belassen und wird daher hier nicht im Detail berichtet. Die Studie liefert allerdings wichtige Hinweise auf mögliche langfristige Automationseffekte im Fahrzeug. Die Autoren berichten verringerte Sicherheitsabstände und eine schlechtere Spurhaltung durch die Probanden in einem Zeitraum von 5 – 6 Minuten nach der Übernahme im Vergleich zu einer Baseline. Die Studie simulierte ein sehr spezifisches Szenario einer automatisierten Konvoi-Fahrt mit sehr kurzen time headways. Entsprechend ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf eine individuelle automatisierte Fahrt in gemischtem Verkehr möglicherweise eingeschränkt. Allerdings deuten die Ergebnisse darauf hin, dass auch längerfristige Effekte von automatisiertem Fahren auftreten können, die die Qualität der Übernahme über den Zeitraum des Erlangens der motorisch, visuellen und kognitiven Kontrolle hinaus beeinflussen.

3.2.12. Dogan, Deborne, Delhomme, Kemeny & Jonville (2014)

Die Studie *Evaluating the shift of control between driver and vehicle at high automation at low speed: The role of anticipation* von Dogan et al. (2014) untersuchte die Effekte der Antizipation von Übernahmeaufforderungen auf das Fahrerverhalten in einem Stau-Szenario. Die Erwartung einer bevorstehenden Übernahme wurde durch die Modellierung des umgebenden Verkehrs sowie den Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeugs beeinflusst.

Die Studie wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit $N = 21$ Teilnehmern (Alter $M = 38.52$, $SD = 9.04$ Jahre, 6 weiblich) durchgeführt. Das simulierte Szenario war eine zweispurige Autobahn mit einigen leichten Kurven und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 110 km/h. Die Automation war nur in den Abschnitten der Strecke mit einem simulierten Stau aktiv, wobei bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h die vollständige Längs- und Querführung des Fahrzeugs übernommen wurde. Der Stau dauerte 10 Minuten. Das Geschwindigkeitsprofil des Staus wurde anhand von Beobachtungen in zwei realen Staus generiert und beinhaltete einen Geschwindigkeitsbereich von 3.6 km/h bis 50 km/h.

Der Versuch wurde als ein gemischtes Design umgesetzt, wobei der Faktor *Erwartung der Übernahme* (drei Stufen, *Anticipation*, *No Anticipation*, *Baseline*) als Messwiederholung, und der Faktor *Nebenaufgabe* (zwei Stufen, *Nebenaufgabe*, *keine Nebenaufgabe*) als unabhängiger Faktor variiert wurde. In der Bedingung, in der eine Übernahme von den Probanden erwartet werden konnte, wurde eine akustische Warnung ausgegeben, wenn sich das Fahrzeug der Geschwindigkeits-Obergrenze der Automation (50 km/h) näherte. Gleichzeitig begann der Verkehr um das Fahrzeug besser zu fließen und die Verkehrsdichte nahm ab. In der Bedingung, in der eine Übernahme für die Probanden unerwartet verlangt wurde, fuhr die Automation mit 35 km/h in stockendem Verkehr. Den Versuchsteilnehmern wurde es frei gestellt, eine Nebenaufgabe zu bearbeiten und zum Beispiel mit einem Smartphone zu interagieren oder eine Zeitschrift zu lesen. Die Teilnehmer wurden Post-Hoc in zwei Gruppen eingeteilt, je nachdem, ob sie während des Versuchs eine Nebenaufgabe bearbeitet hatten ($N = 12$) oder das Angebot nicht wahrgenommen wurde ($N = 9$).

Die Reaktionszeit wurde definiert als die Zeit, die zwischen der akustischen Übernahmeaufforderung und der ersten Reaktion an einem der Stellteile (Lenkrad, Pedale, Knopf am Lenkrad) verstrich. Für die Probandengruppe, die eine Nebenaufgabe bearbeitete, zeigten sich mittlere Reaktionszeiten von $M = 2.19$ ($SD = 0.91$) Sekunden für eine antizipierte Übernahme und $M = 2.48$ ($SD = 0.89$) Sekunden für eine nicht antizipierte Übernahme. Der Unterschied war nicht statistisch signifikant. In der Probandengruppe, die sich nicht mit einer Nebenaufgabe beschäftigte, waren die Reaktionszeiten tendenziell kürzer. Auch hier war der Unterschied allerdings nicht signifikant. Die Autoren argumentieren, dass für beide Probandengruppen durch die Automation eine Reduktion der Vigilanz bereits nach einer Automationsphase von zehn Minuten eintrat. Dogan et al. (2014) berichten weiterhin, dass ein Großteil der Versuchsteilnehmer davon ausging, dass keine Automationsfehler auftreten würden und daher erst die Kontrolle übernahmen, wenn eine Warnung ausgegeben wurde. Die Autoren diskutieren die Verwendung von Fahrerzustandsüberwachung und Car-to-X Infrastruktur, um die Vigilanz und Aufmerksamkeit des Fahrers mit der aktuellen Verkehrssituation in Verbindung zu setzen und entsprechende Verhaltensempfehlungen an den Fahrer generieren zu können.

Dogan et al. (2014) fanden keine eindeutigen Hinweise auf eine Rolle der Antizipation für die Reaktionszeit auf eine Übernahmeaufforderung. Die Idee der Studie ist vergleichbar mit der Idee aus Gold et al. (2013a), wonach eine Zwischenstufe der Überwachung

Automationseffekte verringern und Reaktionszeiten bei der Übernahme verringern soll. Auch in Gold et al. (2013a) waren die positiven Auswirkungen einer solchen Zwischenstufe gering. Es scheint, als sei eine basale Übernahmezeit zwischen 2 bis 4 Sekunden schwer zu unterschreiten, auch wenn zuvor schon Informationen über die Umgebung aufgenommen werden konnten. Diese Hypothese ist vereinbar mit der Ablaufanalyse des Übernahmeprozesses aus Damböck (2013), nachdem dieser Zeitraum hauptsächlich für das Erlangen der motorischen Kontrolle sowie für die visuelle Informationssuche verwendet wird. Längere Übernahmezeiten sind zu erwarten, sobald eine Übernahme nicht nur wie in Dogan et al. (2014) über den Zeitpunkt der ersten Reaktion, sondern über das erfolgreiche Abschließen der Reaktion sowie die Qualität der Reaktion definiert wird.

3.2.13. Lorenz, Kerschbaum & Schumann (2014)

Die Veröffentlichung *Designing take over scenarios for automated driving: How does augmented reality support the driver to get back into the loop?* von Lorenz et al. (2014) vergleicht zwei Augmented Reality (AR) Konzepte hinsichtlich ihres Einflusses auf die Übernahmezeit von einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung. Das Konzept „AR red“ projiziert im Fall einer Übernahmeaufforderung einen roten Bereich auf die Straße, der nicht befahren werden sollte, um zum Beispiel Konflikte mit Fahrzeugen auf der Nebenspur zu vermeiden. Das Konzept „AR green“ projiziert hingegen einen sicheren Korridor in grün auf die Straße, der mögliche freie Wege repräsentiert.

An der Studie nahmen $N = 46$ Personen im Alter von 20 bis 54 Jahren ($M = 31.7$, $SD = 10.1$, 22% weiblich) teil. Die Probanden wurden per Zufall in die drei Gruppen „AR red“, „AR green“ sowie eine Kontrollgruppe aufgeteilt. Die Studie wurde in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt, in dem eine dreispurige Autobahn simuliert wurde. Die Automation fuhr auf dieser Strecke mit einer Geschwindigkeit von maximal 120 km/h. Die Probanden bearbeiteten während der automatisierten Fahrt als Nebenaufgabe den visuell, motorisch und kognitiv ablenkenden Surrogate Reference Task (SuRT) auf einem Tablet Computer, der in die Mittelkonsole integriert war. Nach ca. 8 Minuten automatisierter Fahrt wurde eine Übernahmeaufforderung getriggert, die durch ein blinkendes Icon am Armaturenbrett, sowie eine akustische Warnung (Sinuston) charakterisiert war. Die Übernahmeaufforderung wurde von dem System mit einem Zeit-Budget von 7 Sekunden als Reaktion auf einen verunfallten Wagen auf der Fahrspur ausgelöst.

Mehrere Zeitpunkte wurden als verschiedene Stadien der Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer definiert: Gaze reaction, road fixation, hands on, take-over time, side mirror, indicator. Die Kriterien für die Zeitmessungen zu diesen Zeitpunkten waren analog zu Gold et al. (2013b) festgelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reaktion auf die Übernahmeaufforderung (Lenkwinkel $> 2^\circ$, Bremspedalstellung $> 10\%$) mit dem Konzept „AR red“ nach $M = 2.86$ ($SD = 0.77$) Sekunden, mit dem Konzept „AR green“ nach $M = 2.91$ ($SD = 0.97$) Sekunden, und ohne Unterstützung durch AR nach $M = 3.03$ ($SD = 0.86$) Sekunden erfolgte. Die Unterschiede zwischen den Gruppen waren nicht statistisch signifikant. Ein deutlicher Unterschied zwischen beiden AR-Bedingungen und der Kontrollbedingung wurde in der Art der Reaktion auf die Übernahmeaufforderung gefunden. Während ein Großteil der Probanden in der Kontrollbedingung ausschließlich lenkte, um dem Unfallfahrzeug auszuweichen, reagierten die Probanden in den AR-Bedingungen signifikant häufiger mit einer Kombination aus Lenken und Bremsen (siehe Abbildung 10).

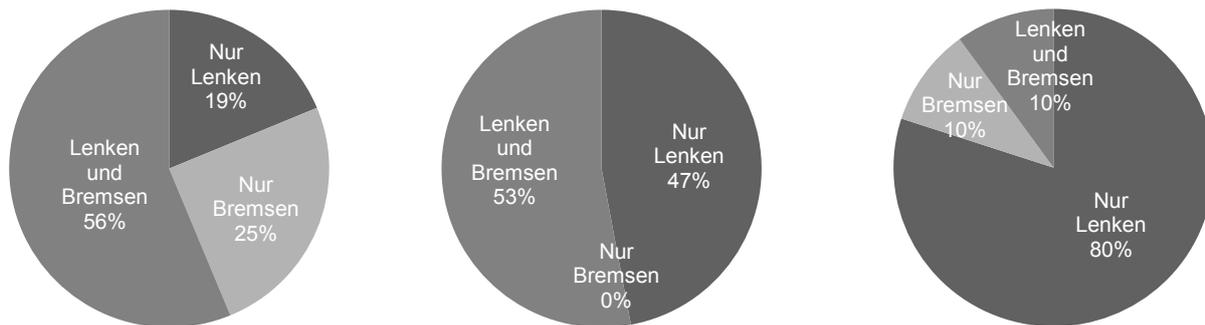


Abbildung 10: Verteilung der Reaktionsarten auf eine Übernahmeaufforderung zwischen den Versuchsgruppen. Links: Konzept AR green. Mitte: Konzept AR red. Rechts: Kontrollbedingung. Modifiziert nach Lorenz et al. (2014), S. 1684.

Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass die Unterstützung durch AR zwar keine signifikanten Effekte auf die Übernahmezeit hat, durch den Hinweischarakter des Konzepts „AR green“ allerdings positive Effekte für die Qualität der Übernahme entstehen konnten (häufigeres Bremsen, sicherere Trajektorien mit niedrigeren Beschleunigungen). Negative Effekte des Konzepts waren eine niedrigere Wahrscheinlichkeit zur Absicherung der gefahrenen Trajektorie hinsichtlich der Verwendung des Blinkers sowie des Blicks in den Seitenspiegel.

Die Studie von Lorenz et al. (2014) verdeutlicht, wie durch die Hinzunahme von zusätzlichen Informationen und Hinweisen die Qualität des Übergangsvorgangs verbessert werden kann. Die Autoren liefern erste Hinweise auf einen positiven Effekt von AR-Konzepten für die Verbesserung der Reaktion nach der initialen Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer. Die gemessene initiale Übernahmezeit von ca. 3 Sekunden ist ein Indikator für die Zeitspanne zwischen einer Warnung und dem ersten Eingreifen in die Steuerung des Fahrzeugs. Weiterhin berücksichtigt werden sollte allerdings auch die Dauer bis zum Abschluss der Reaktion, um eine mit einer manuellen Fahrt vergleichbare Qualität der Fahrzeugführung zu erreichen. Die berichteten Trajektorien in Lorenz et al. (2014) deuten darauf hin, dass das Aufbereiten und Kommunizieren von Umgebungsinformationen dem Fahrer helfen kann, ein Situationsbewusstsein aufzubauen, das sich positiv auf die Fahrleistung auswirkt.

3.2.14. Merat, Jamson, Lai, Daly & Carsten (2014)

In der Studie von Merat et al. (2014) *Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle*, liegt der Fokus auf dem Fahrerverhalten während und nach der erfolgten Übernahme aus einer hochautomatisierten Fahrt. Ähnlich zu Brandenburg & Skottke (2014) wird also nicht nur der Moment bis zur Übernahme der manuellen Steuerung untersucht, sondern auch die Blick- und Fahrdaten nach einer (erfolgreichen) Übernahme betrachtet.

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator mit N = 37 Probanden im Alter von 28 bis 67 Jahren (M = 47.35, SD = 10.33) durchgeführt. Das simulierte Szenario war eine dreispurige Autobahn mit leichten S-Kurven, auf der die Automation mit einer Geschwindigkeit von ca. 113 km/h (70 mph) die vollständige laterale und longitudinale

Kontrolle über das Fahrzeug übernahm. Der minimale Abstand zu möglichen vorausfahrenden Fahrzeugen war auf 1.5 Sekunden festgelegt.

Alle simulierten Übergabeszenarien waren charakterisiert durch die Verengung der Fahrspur von drei Spuren zu einer Spur, auf die die Probanden sich einordnen sollten. Der Beginn der Szenarien wurde jeweils von einem dynamischen Autobahnschild 300 Meter vor der letzten Möglichkeit die Fahrspur zu wechseln, angekündigt. Übernahmeaufforderungen waren unabhängig von der sich verengenden Straßenführung und wurden entweder in festen Intervallen von 6 Minuten oder auf der Grundlage eines Echtzeit-Algorithmus zur Überwachung der visuellen Aufmerksamkeit des Fahrers mithilfe von Eye-Tracking ausgelöst.

Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass nach einer Situation, in der die Probanden eingreifen mussten um die Spur zu wechseln, mehr visuelle Aufmerksamkeit auf die Mitte der Fahrbahn gerichtet wurde, wenn vorher Übernahmen in festen Intervallen notwendig waren. Nach einer Fahrt, in der die Automation in Abhängigkeit des Algorithmus Übernahmen verlangte, zeigte sich nach dem Eingreifen eine höhere Variabilität der Blickdaten und signifikant weniger Blicke zur Straßenmitte. Merat et al. (2014) berichten, dass die Probanden ca. 10 Sekunden brauchten, um wieder die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Auf diese Phase von 10 Sekunden folgte eine Phase von weiteren 10 bis 20 Sekunden, während denen die Qualität der Spurhaltung im Vergleich zur Baseline verschlechtert war. Die Qualität der Spurhaltung wurde gemessen als Standard Deviation of Lane Position, Anzahl der 1° steering reversals, und als High Frequency Control of Steering im 0.3 – 0.6 Hz Band. Insgesamt beschreiben die Autoren von der Baseline abweichende Augenbewegungen für bis zu 40 Sekunden nach der Übernahme, sowie eine Stabilisierung der lateralen Kontrolle nach 35 bis 40 Sekunden. Eine Zeitspanne von 40 Sekunden wird als eine komfortable Zeit für eine Übernahme aus einer hochautomatisierten Fahrt vorgeschlagen.

In der Studie von Merat et al. (2014) wird sehr deutlich, wie groß die Unterschiede der berichteten Übernahmezeiten in Abhängigkeit der angelegten Kriterien, verwendeten Szenarien, und angewendeten Methoden ausfallen können. Während in Studien, die sich auf den Moment der Übernahme in einer mehr oder weniger kritischen Situation konzentrieren je nach angelegtem Kriterium Zeiten zwischen 2 – 8 Sekunden berichtet werden (Damböck et al., 2012; Dogan et al., 2014; Gold et al., 2013a; Gold et al., 2013b; Lorenz et al., 2014; Petermann-Stock et al., 2013), führt die Analyse des Fahrerverhaltens nach einer Übernahme in wenig kritischen Situationen zu Aussagen, die ein verändertes Verhalten für einen deutlich längeren Zeitraum vorhersagen (Brandenburg & Skottke, 2014; Merat et al., 2012; Merat et al., 2014; teilweise Wulf et al., 2013). Zu diskutieren bleibt hier letztlich die Eignung der jeweiligen Kriterien, die für eine sichere, und/oder komfortable Übernahme angesetzt wurden. Grundsätzlich scheint es eine deutliche Diskrepanz zwischen einer ausreichenden Zeit für die motorische Übernahme der Kontrolle sowie das visuelle Erfassen der Umgebung und einer ausreichenden Zeit für die Rückkehr zu einem mit einer manuellen Fahrt vergleichbarem Fahrerverhalten zu geben.

3.2.15. Naujoks, Mai & Neukum (2014)

In *The Effect of Urgency of Take-Over Requests During Highly Automated Driving Under Distraction Conditions* von Naujoks et al. (2014) untersuchen die Autoren den Einfluss der Modalitäten von Warnungen bei Übernahmeaufforderung von einer automatisierten Fahrt zur

manuellen Steuerung in unterschiedlichen Übernahmeszenarien bei niedrigen Geschwindigkeiten.

In einem dynamischen Fahrsimulator wurde ein Versuch mit einer Stichprobe von $N = 16$ Versuchsteilnehmern durchgeführt. Die Modalität der Übernahmeaufforderung wurde zwischen den Teilnehmern variiert. Die verschiedenen Übernahmeszenarien wurden von allen Teilnehmern gefahren. Die Modalitäten „visual“ und „visual auditory“ wurden als ein blinkendes Symbol, sowie als ein blinkendes Symbol in Kombination mit einem Sinuston (Dauer 1 Sekunde, 1000 Hz) umgesetzt. Die Übernahmeszenarien orientierten sich an Systemgrenzen der Automation und sollten unterschiedliche Schwierigkeitsgrade repräsentieren. Alle Szenarien fanden auf einer dreispurigen Autobahn mit hohem Verkehrsaufkommen und bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h statt. In dem Szenario „easy“ wurden auf einem graden Streckenabschnitt die Fahrbahnmarkierungen entfernt. Die Probanden mussten hier nicht unmittelbar eingreifen. In dem Szenario „moderate“ wurde auf einem graden Streckenabschnitt der Beginn einer Baustelle simuliert, vor der die Fahrer einen Spurwechsel durchführen mussten, um den temporären Linien zu folgen. In dem Szenario „difficult“ wurde auf einem kurvigen Straßenabschnitt eine Übernahmeaufforderung ohne einen ersichtlichen Grund ausgelöst. Die Probanden bearbeiteten während der automatisierten Fahrt eine Nebenaufgabe, für die diverse Textpassagen einer Wochenzeitung gelesen werden sollten.

Als Reaktionszeit wurde die Zeit zwischen der Warnung und dem Moment, in dem der Fahrer die Hände wieder am Lenkrad hatte, definiert. Für die rein visuelle Warnung wurde eine Reaktion nach $M = 6.19$ (Perzentile: 5% = 0.10, 50% = 2.04, 95% = 20.95) Sekunden gemessen. Für die multimodale Warnung als Kombination aus visueller Warnung und auditivem Tonsignal wurde eine Reaktion nach $M = 2.29$ (Perzentile: 5% = 0.81, 50% = 1.99, 95% = 5.57) Sekunden gemessen. Insgesamt wurden signifikante Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten und der Spurhaltequalität (gemessen als maximum lateral position und standard deviation of lane position) für die Modalitäten festgestellt. Eine Kombination aus visueller und auditiver Warnung führte hierbei immer zu einer Verbesserung im Vergleich zu einer rein visuellen Warnung. Diese Unterschiede sind zudem hauptsächlich in den Szenarien „moderate“ und „difficult“ zu beobachten.

Naujoks et al. (2014) empfehlen auf der Grundlage der Studie die Verwendung von multimodalen Hinweisreizen für eine Übernahmeaufforderung, besonders wenn Fahrer durch eine Nebenaufgabe abgelenkt sind. Auch die Komplexität der Situation scheint einen Einfluss auf die Qualität der Übernahme zu haben.

3.2.16. Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid & Bengler (2014)

Die Studie *How Traffic Situations And Non-Driving Related Tasks Affect The Take-Over Quality In Highly Automated Driving* von Radlmayr et al. (2014) untersucht den Einfluss unterschiedlicher Verkehrssituationen auf die Übernahmezeit und die Übernahmequalität aus einer hochautomatisierten Fahrt. Zusätzlich wird eine eher kognitiv-sprachliche Nebenaufgabe mit einer hauptsächlich visuellen Nebenaufgabe verglichen, um den Einfluss der Art der Beanspruchung auf die Übernahmesituation zu quantifizieren.

$N = 48$ Teilnehmer im Alter von $M = 33.5$ (SD = 9.0) Jahren fuhren in einem dynamischen Fahrsimulator auf einer simulierten dreispurigen Autobahn-Strecke mit einigem umgebenden Verkehr. Die Automation fuhr auf dieser Strecke mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h. Die Teilnehmer waren in drei gleich große Gruppen unterteilt. Die Gruppe „Baseline“ fuhr auf

der gesamten Strecke manuell und bearbeitete den sprachlichen n-back-task, während die Gruppen „n-back“ und „SuRT“ automatisiert gefahren wurden und entsprechend während der Fahrt den n-back-task oder den SuRT präsentiert bekamen. Vier komplexe Situationen wurden in der Simulation umgesetzt. In allen vier Situationen wurde eine Unfallstelle mit einem Abstand von 7 Sekunden plötzlich sichtbar, die die Fahrspur blockierte. Für die automatisierten Bedingungen wurde gleichzeitig mit dem sichtbar Werden der Unfallstelle eine akustische Warnung und eine visuelle Warnung in der Instrumententafel ausgegeben. Die vier Situationen unterschieden sich hinsichtlich der Optionen, die den Fahrern zum Vermeiden einer Kollision bleiben:

- Situation 1: Das Hindernis erschien auf der mittleren Spur, die linke und rechte Fahrspur wurde durch Verkehr blockiert.
- Situation 2: Das Hindernis erschien auf der rechten Spur, es war kein umgebender Verkehr sichtbar.
- Situation 3: Das Hindernis erschien auf der linken Spur, es war kein umgebender Verkehr sichtbar.
- Situation 4: Das Hindernis erschien auf der mittleren Spur, es war kein umgebender Verkehr sichtbar.

Die Probanden mussten also entsprechend der Situation entweder eine Bremsreaktion oder einen Spurwechsel ausführen.

Die Übernahmezeit wurde zwischen dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung und dem Initiieren einer Brems- oder Lenkreaktion (Lenkwinkel $> 2^\circ$; Bremspedalposition $> 10\%$) gemessen. Signifikante Unterschiede wurden sowohl für den Faktor „Art der Nebenaufgabe“, als auch für den Faktor „Situation“ gefunden. Die Reaktionszeit der Baseline-Gruppe lag bei $M = 1.84^5$, und war damit signifikant niedriger als in der n-back-Gruppe ($M = 2.38$) und in der SuRT-Gruppe ($M = 2.37$). Signifikant längere Reaktionszeiten im Vergleich zu Situation 2 wurden in der Situation 1 gemessen ($M = 1.99$ vs. $M = 2.65$). Die längste gemessene Reaktionszeit lag bei 6.43 Sekunden in der n-back-Gruppe in Situation 1. Die Reaktionszeiten sind in Abhängigkeit von der Situation und der Nebenaufgabe noch einmal in Abbildung 11 dargestellt. Zusätzlich wurden für die Situation 1 eine kürzere time to collision (TTC), höhere Bremskräfte sowie deutlich mehr Kollisionen mit dem Hindernis oder dem umgebenden Verkehr ($M = 5.0$, $SD = 2.65$) festgestellt.

Die Autoren interpretieren die Ergebnisse hinsichtlich einer höheren Anforderung an das Situationsbewusstsein in Situation 1. Besonders die Wahrnehmung und die Integration der Fremdfahrzeuge in dieser Situation werden als Faktor für eine längere Reaktionszeit und eine geringere Qualität der Übernahme bewertet. Weiterhin werden die geringen gemessenen Unterschiede zwischen den Nebenaufgaben als eine vergleichbare Ablenkung durch kognitiv-sprachliche und visuelle Aufgaben interpretiert. Radlmayr et al. (2014) schließen: „Eyes-on-road do not guarantee higher situation awareness compared to visual distraction in the case of highly automated driving“ (S. 2067).

Die Autoren konnten zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der Komplexität der Situation, und der Länge der Reaktionszeit auf eine Übernahmeaufforderung besteht. Soll somit ein sicherer Übernahmezeitpunkt definiert werden, muss entweder die höchste zu

⁵ Standardabweichungen für die Reaktionszeiten sind in Radlmayer et al. (2014) nur grafisch angegeben und können somit hier nicht berichtet werden.

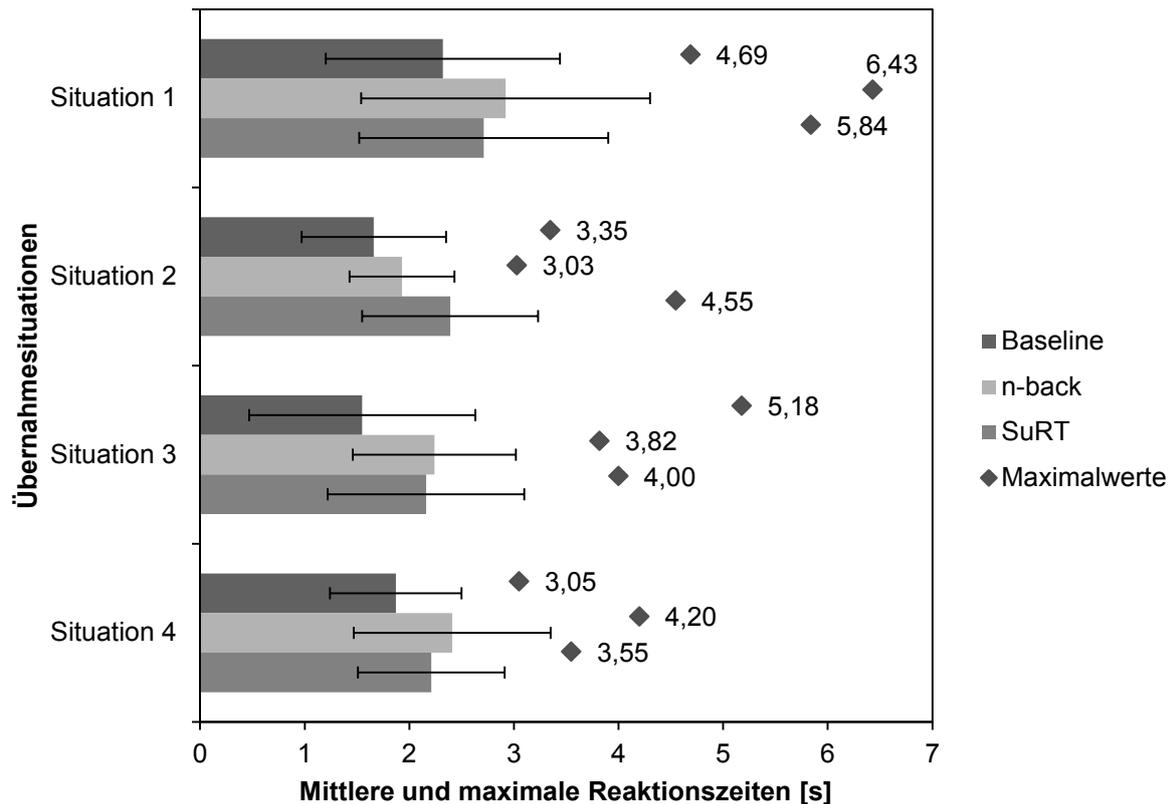


Abbildung 11: Mittelwerte und Standardabweichungen, sowie Maximalwerte der Reaktionszeiten in den verschiedenen Situationen und Versuchsgruppen. Modifiziert nach Radlmayr et al. (2014), S. 2065.

erwartende Komplexität einer Straßensituation in Betracht gezogen, oder der Übernahmezeitpunkt dynamisch an die Komplexität adaptiert werden. In der Studie wurden zudem Hinweise auf eine ähnliche Beanspruchung und Ablenkung in kognitiv-sprachlichen Aufgaben wie in rein visuellen Aufgaben gefunden. Sollte in einem Fahrzeug eine Aufgabe bearbeitet werden, die sowohl kognitiv als auch visuell ablenkend ist, sind längere Übernahmezeiten und ein weiterer Abfall der Übernahmequalität zu erwarten. Beispiel für solche Aufgaben sind Tätigkeiten, die sich schon heute (illegal) im Fahrzeug finden, wie das Schreiben von SMS und Emails, oder die Verwendung von Smartphones, Tablet-PCs und Laptops.

3.2.17. Shen & Neyens (2014)

Die Studie *Assessing drivers' performance when automated driver support systems fail with different levels of automation* von Shen & Neyens (2014) untersucht die Übernahme der Kontrolle über ein Fahrzeug aus einer automatisierten Längsführung im Vergleich zu einer Übernahme aus einer automatisierten Längs- und Querführung. Die Studie wird hier nur kurz betrachtet, da die Versuchsteilnehmer nicht instruiert waren ihre Hände in der hochautomatisierten Fahrt vom Lenkrad zu nehmen und keine Nebenaufgabe ausgeführt werden sollte.

Mit $N = 48$ Versuchspersonen im Alter von 18 bis 25 ($M = 21.9$, $SD = 2.99$) Jahren wurde in einem statischen Fahrsimulator die Reaktionszeit auf eine Übernahmeaufforderung untersucht. Die Übernahmeaufforderung war durch einen akustischen Warnton

charakterisiert. 83% der Teilnehmer in der Bedingung mit einer automatisierten Längs- und Querführung entfernten während der Fahrt ihre Hände vom Lenkrad obwohl dieses Verhalten nicht konkret instruiert wurde. Entsprechend lagen die Übernahmezeiten für die höhere Automationsstufe signifikant über denen der automatisierten Längsführung ($M = 1.66$ vs. $M = 0.95$ Sekunden⁶). Eine Übernahme wurde charakterisiert als erste Reaktion an Lenkrad oder Bremse nach der Übernahmeaufforderung. Unterschiedliche simulierte Verkehrsszenarien (gerade Streckenführung und kein Fremdverkehr; kurvige Strecke mit Fremdverkehr; gerade Streckenführung mit Fremdverkehr) führten hier zu keinen statistisch signifikanten Unterschieden in den Reaktionszeiten.

Die Studie von Shen & Neyens (2014) zeigt, dass, auch wenn eine Überwachung der Automation durch den Fahrer vorausgesetzt werden kann, schon nach einer kurzen Strecke (15 Minuten automatisierte Fahrt) negative Effekte einer höheren Automation auftreten können, die sich hier in den verlängerten Reaktionszeiten niederschlagen. Verglichen mit anderen Studien sind die Reaktionszeiten in dieser Studie sehr gering, was sich aus der fehlenden Ablenkung der Probanden durch eine Nebenaufgabe und die zeitlich kurze Überwachung der Automation ergibt. Selbst ohne eine Nebenaufgabe kann ein weiterer Abfall der Leistung des Fahrers bei der Übernahme der manuellen Steuerung erwartet werden, wenn die Automation über einen längeren Zeitraum überwacht werden muss, und eine Vigilanzreduktion wahrscheinlicher wird. Ein weiterer interessanter Fokus der Studie liegt auf der Abhängigkeit der Leistung bei der Übernahme der manuellen Steuerung von einem individuellen Vertrauen in die Fähigkeiten der Automation. Die Studie zeigt hier, dass bei einem Ausfall der Querführung Probanden mit einem höheren Automationsvertrauen schlechtere Leistungen zeigen als Probanden mit einem geringeren Vertrauen in die Fähigkeiten der Automation.

3.2.18. Strand, Nilsson, Karlsson & Nilsson (2014)

In der Studie *Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures* von Strand et al. (2014) untersuchen die Autoren die Auswirkungen des Grades der Automation und der Schwere des Automationsfehlers auf die Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung in einem Fahrzeug.

Das Experiment wurde in einem dynamischen Fahrsimulator mit $N = 36$ Versuchspersonen im Alter von $M = 43.2$ ($SD = 9.6$, zwischen 25 und 64 Jahren) Jahren durchgeführt. An der Studie nahmen 28 Männer und 8 Frauen teil. In der hochautomatisierten Bedingung wurde ein Stau-Assistent simuliert, der die Längs- und Querführung mit einer Geschwindigkeit von maximal 70 km/h übernehmen konnte. Die simulierte Strecke bestand aus einer Landstraße mit jeweils einer Fahrbahn pro Fahrtrichtung. Auf der Gegenfahrbahn war dichter Verkehr simuliert, während auf der Ego-Fahrstrecke ein Stau mit durchschnittlich 50 km/h und gelegentlichem vollständigen Stillstand dargestellt wurde. Die Hälfte der Teilnehmer in dem Versuch fuhr hochautomatisiert (Längs- und Querführung). Die andere Hälfte fuhr assistiert durch ein adaptives Abstandhaltesystem (ACC). Alle Versuchspersonen waren während der Experimentalfahrt allen drei Automationsfehlern ausgesetzt. Die Automationsfehler bezogen sich ausschließlich auf Fehler in der Bremsung und wurden charakterisiert als

- moderat (60% Bremskraft),

⁶ Die Standardabweichung wurde in Shen & Neyens (2014) ausschließlich grafisch berichtet, und kann daher hier nicht wieder gegeben werden.

- akut (30% Bremskraft), und
- vollständig (0% Bremskraft).

Alle Automationsfehler traten in einer Situation auf, in der sich ein Stau vor dem Fahrzeug aufgebaut hatte, und das Führungsfahrzeug plötzlich stark bremste. Um eine Kollision zu vermeiden mussten die Probanden das Bremspedal stark durchdrücken. Die manuelle Bremskraft war nicht von Bremskraft, die durch die Automation zur Verfügung gestellt wurde, beeinträchtigt. Um die Fahrleistung der Probanden zu messen, wurde eine Reihe von Maßen erhoben:

- Point of No Return event (PoNR event): Um die Fahrt nicht zu unterbrechen, wurden keine Kollisionen mit dem vorausfahrenden Fahrzeug zugelassen. Stattdessen war ein „Point of No Return“ definiert, an dem eine Kollision mit dem Führungsfahrzeug auch bei Vollbremsung unvermeidbar wurde. Wurde dieser Punkt überschritten, beschleunigte das Führungsfahrzeug stark, wodurch eine Kollision vermieden wurde. Jedes Überschreiten des PoNR wurde als ein kritisches Ereignis vergleichbar mit einer Kollision gewertet.
- Minimum Time To Collision (MTTC): Die minimale Zeit bis zu einer Kollision zwischen Ego-Fahrzeug und Führungsfahrzeug unter der Voraussetzung, dass das Ego-Fahrzeug die gegenwärtige Geschwindigkeit beibehält, gemessen als Zeit zwischen dem Bremsen des Führungsfahrzeugs und der Vermeidung einer Kollision.
- Minimum Time HeadWay (MTHW): Die Zeit, die das Ego-Fahrzeug benötigen würde, um bis zu der Position des Führungsfahrzeug zu gelangen, unter der Voraussetzung, dass beide Fahrzeuge ihre gegenwärtige Geschwindigkeit beibehalten, gemessen als Zeit zwischen dem Bremsen des Führungsfahrzeugs und der Vermeidung einer Kollision.
- Reaction Time (RT): Zeit zwischen dem Bremsen des Führungsfahrzeugs und dem Betätigen des Bremspedals im Simulator.

Für die Reaktionszeiten wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlichen Ausmaßen des Automationsfehlers gefunden. Die Probanden benötigten tendenziell länger um zu reagieren, wenn die die Automation nur teilweise ausgefallen war und noch partiellen Bremsdruck zur Verfügung stellte. Die Reaktionszeiten lagen bei $M = 1.85$ ($SD = 0.46$) Sekunden für eine 0% Bremsung bei $M = 2.04$ ($SD = 0.55$) Sekunden für eine 30% Bremsung, und bei $M = 2.57$ ($SD = 1.05$) Sekunden für eine 60% Bremsung. Die Ergebnisse für die Anzahl der PoNR events, MTTCs und MTHWs bekräftigen diese Aussage. Signifikant längere Reaktionszeiten wurden auch in der hochautomatisierten Bedingung im Vergleich zur assistierten Bedingung gefunden.

Strand et al. (2014) argumentieren, dass die Teilnehmer nicht den Automationsfehler als solchen wahrgenommen haben, sondern die Kritikalität der Situation bewerteten und entsprechend früher oder später in die Kontrolle über das Fahrzeug eingriffen. Bei einem vollständigen Ausfall der Automation entwickelt sich die Situation kritischer, wodurch Fahrer eine schnellere, aber auch qualitativ schlechtere Reaktion zeigen.

Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen von Gold et al. (2013b), die zwar bei einer kürzeren zur Verfügung stehenden Übernahmezeit auch schnellere Reaktionen der Probanden beobachteten, gleichzeitig aber Hinweise auf eine Verschlechterung der Qualität der Fahrleistung bei der Übernahme aufzeigten. Im Vergleich zu den Studien von Gold et al. (2013b) und zum Beispiel Petermann-Stock et al. (2013) wurde die Automation in Strand et

al. (2014) von den Fahrern überwacht. Dass sich trotzdem Übernahmezeiten von bis zu 3 Sekunden finden, deutet auf deutliche Automationseffekte und zu erwartende längere Zeiten bei Ablenkung durch eine Nebenaufgabe hin. Gleichzeitig weisen die Ergebnisse darauf hin, dass eine partielle Bremsung, wie sie zum Beispiel verwendet werden könnte, um die zur Verfügung stehende Zeitspanne während einer Übernahme zu verlängern (vgl. Zeeb et al., 2015), negative Effekte auf die Reaktionszeit der Fahrer haben kann. Hierdurch könnten sich mögliche positive Effekte eines Abbremsens des Fahrzeugs in einer Übernahmesituation auflösen oder sogar umkehren.

3.2.19. Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr, Josten & Eckstein (2015)

In der Studie „*Bitte übernehmen Sie das Fahren!*“ *Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien* von Petermann-Stock et al. (2015) untersuchten die Autoren vier Arten von Warnungen als Hinweisreize für eine Übernahmeaufforderung aus einer hochautomatisierten Staufahrt. Außerdem wurde die Intensität der Warnung in zwei Stufen variiert, sowie die Leistungen einer jüngeren Stichprobe mit einer älteren Stichprobe verglichen.

An der Studie nahmen insgesamt N = 108 Versuchspersonen im Alter von 25 bis 70 Jahren teil. Die Stichprobe war aufgeteilt in jüngere Fahrer (25 – 35 Jahre) und ältere Fahrer (50 – 70 Jahre) sowie entsprechend der drei präsentierten Warnmodalitäten *sprachlich*, *haptisch*, und *optisch* auf Personengruppen mit N = 36 Probanden verteilt. Die Studie wurde in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt. Das simulierte Szenario war eine Staufahrt auf einer Autobahn, in der die Automation bei einer Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h die Längs- und Querführung regeln konnte. Während der automatisierten Staufahrt wurde eine Nebenaufgabe von den Probanden durchgeführt, die aus einem Wissensquiz bestand, bei dem die Antworten über den Touchscreen eines Laptops auf dem Schoß der Versuchsteilnehmer eingegeben werden mussten. Die Probanden wurden instruiert, ihren Fokus auf die Bearbeitung der Nebenaufgabe zu legen, da es um die Bewertung der Nutzung der freigewordenen Zeit durch die Automation gehe. Es erfolgte kein Hinweis auf mögliche Systemgrenzen des Stauassistenten.

Die Übernahmeaufforderungen ereigneten sich entweder in der Annäherung an eine Rechtskurve oder als Reaktion auf ein stark bremsendes Führungsfahrzeug. Die Übernahmeaufforderung wurde immer durch eine Meldung im Kombiinstrument begleitet, und war zusätzlich umgesetzt als akustischer „gong“ (*baseline*), als Sprachausgabe (*sprachlich*), als Vibration des Fahrersitzes (*haptisch*) oder als LED-Lauflicht (*optisch*). Zusätzlich wurde die Intensität des Signals in den drei Experimentalbedingungen jeweils über modalitätenspezifische Parameter variiert (z.B. Frequenz, Amplitude, Geschwindigkeit).

Ausgehend von einer Kombination des Fahrermodells beim automatisierten Fahren nach Eckstein & Zlocki (2014) ergänzt durch weitere Ansätzen zu Fahrerverhalten in einem hochautomatisierten Fahrzeug, entwickelten Petermann-Stock et al. (2015) vier Messzeitpunkte für die Quantifizierung der Übernahmezeit (vergleiche auch Abbildung 12) :

- T1: Orientierungsreaktion, definiert als erstes Aufblicken von der Nebenaufgabe.
- T2: Handlungsbereitschaft, definiert als erste erkannte Bewegung des Bremspedals, bzw. erster physischer Kontakt mit dem Lenkrad.
- T3: Handlungsdurchführung, definiert als signifikantes Bremsen über Grundrauschen, bzw. Wendestelle des Lenkradwinkels (Änderung des Gradienten).

- T4: Fahrzeugstabilisierung, definiert bezüglich der Bremsung als Zeitpunkt des minimalen Abstands zum Vorderfahrzeug in Zeit zwischen Systemabwurf und Systemreaktivierung; definiert bezüglich der Lenkung als Zeitpunkt, bei dem das Egofahrzeug den gleichen Abstand zur Mittellinie wie vor dem Systemabwurf erreicht.

Für die sprachliche Ausgabe der Übernahmeaufforderung wurden für die Zeitpunkte T1 und

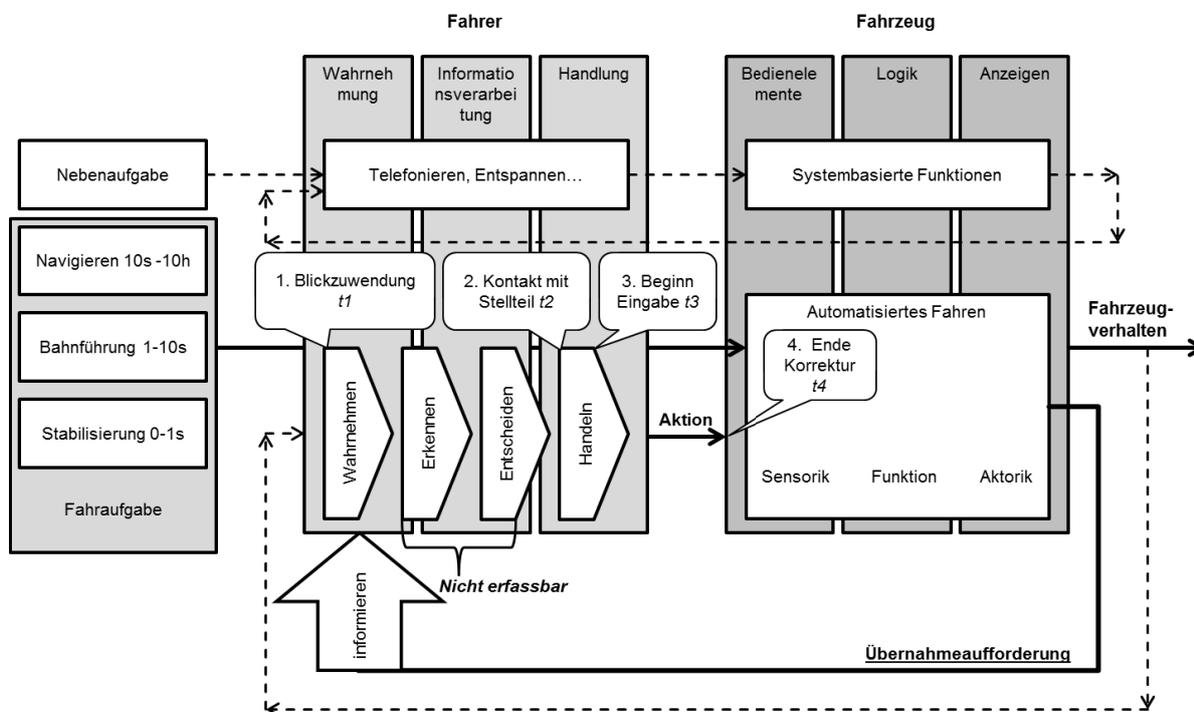


Abbildung 12: Prozess der Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer nach vorheriger Bearbeitung von Nebenaufgaben während einer hochautomatisierten Fahrt; erweiterte Grafik nach Eckstein & Zlocki (2014) mit Inhalten aus Hoffmann & Gayko (2009), Luczak (1975), Donges (2009). Modifiziert nach Petermann-Stock et al. (2015), S. 349.

T2 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen gefunden. Die Reaktionszeiten lagen für T1 durchschnittlich bei ca. 0.7 Sekunden, für T2 bei ca. 1.8 Sekunden (abgeschätzt anhand von Grafik). Für die haptische Ausgabe der Übernahmeaufforderung reagierten die älteren Fahrer signifikant langsamer, bezogen auf den Zeitpunkt T2 (ca. 2.1 Sekunden im Vergleich zu ca. 1.6 Sekunden für die jüngeren Fahrer). Für den Zeitpunkt T1 gab es keinen Unterschied, wobei diese erste Reaktion durchschnittlich nach ca. 0.5 Sekunden erfolgte. Für die optische Ausgabe der Übernahmeaufforderung ergab sich ein signifikanter Effekt der Intensität des Signals, mit schnelleren Reaktionen in der Baseline, im Vergleich zur höheren Intensität (T1: Baseline ca. 0.5 Sekunden vs. ca. 0.7 Sekunden bei hoher Intensität; T2: Baseline ca. 1.6 Sekunden vs. ca. 2.3 Sekunden bei hoher Intensität; T3: Baseline ca. 2.0 Sekunden vs. ca. 2.4 Sekunden bei hoher Intensität).

Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass „zwischen T1 und T2 die sensitivste Phase der Übernahme liegt“ (Petermann-Stock et al., 2015, S. 365). Hier müsse der Fahrer verstehen, was er in der konkreten Situation tun muss und benötige dafür auch die längste Zeit von ca. 1274 ms. Bis zur Handlungsdurchführung sei ein Zeitraum von durchschnittlich 2.2 Sekunden und maximal 5.8 Sekunden realistisch, wobei für die vollständige

Stabilisierung des Fahrzeugs auch der Zeitpunkt T4 beachtet werden müsse, der in dieser Veröffentlichung nicht berichtet wurde. Effekte der Altersgruppe wurden in der Studie für den Zeitpunkt T2 (ältere Fahrer langsamer) und zwischen T2 und T3 (jüngere Fahrer langsamer) gefunden. Als Warn-Modalität empfehlen die Autoren eine eskalierende Warnstrategie unter Hinzunahme von zusätzlichen Modalitäten zu der Kombination aus visueller und akustischer Warnung, falls eine erste Reaktion ausbleibt. Hierbei müssen die Effekte neuartiger und damit dem Fahrer unbekannter Hinweisreize beachtet werden, die zwar schnelle Orientierungsreaktionen auslösen, aber auch zu Verwirrung hinsichtlich der erwarteten Handlung führen können.

In Petermann-Stock et al. (2015) wurden ähnlich zu den Studien von Damböck (2013), Gold et al. (2013) oder Radlmayr et al. (2014) sehr genaue Kriterien für eine Übernahme anhand einer Abfolge von Zeitpunkten während der Übernahme definiert. Nur über eine solche Definition von Kriterien werden Studien zu der Übernahmezeit aus einer automatisierten Fahrt zu manueller Steuerung vergleichbar. Der postulierte durchschnittliche Zeitraum bis zu einem Erreichen der Handlungsbereitschaft von durchschnittlich 2.2 Sekunden (maximal 5.8 Sekunden) bei vollständiger visueller Ablenkung scheint in Anbetracht früherer Veröffentlichungen realistisch, wenn multimodal gewarnt wird und Probanden durch ein wahrgenommenes Risiko motiviert sind in die Automation einzugreifen. Fraglich ist hingegen, ob daraus geschlossen werden sollte, dass ein aktiv von der Automation zur Verfügung gestellter Zeitraum von z.B. 6 Sekunden ausreichend ist, um Automationseffekte bei der Handlungsausführung und in dem darauf folgenden Zeitraum zu vermeiden (z.B. Brandenburg & Skottke, 2014; Gold et al., 2013b; Merat et al., 2014). Wichtige Hinweise liefert die Studie auch zu der Gestaltung eines Warn-Konzepts zur Verbesserung der Übernahmequalität. Multimodale, in Intensität und Dringlichkeit ansteigende Warnkonzepte versprechen bessere Reaktionsleistungen der Fahrer nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt.

3.2.20. Zeeb, Buchner & Schrauf (2015)

Die Studie *What determines take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving* von Zeeb et al. (2015) untersucht interpersonale Unterschiede im Blickverhalten während einer hochautomatisierten Fahrt als Einflussfaktor auf die Übernahmezeit bei Erreichen einer Systemgrenze der Automation.

Für den Versuch von Zeeb et al. (2015) wurde eine Teilgruppe einer größeren Studie (N = 247) mit N = 89 Personen im Alter von 20 bis 72 Jahren (M = 42.0, SD = 13.0) analysiert. Die Studie wurde in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt. Das simulierte Szenario war eine zweispurige Autobahn, auf der die Automation mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h einem Fahrzeug mit einer Lücke von 2.5, 3.0, oder 3.5 Sekunden folgte. Nach ca. 26 Minuten automatisierter Fahrt trat ein kritisches Szenario auf, das zu einer Übernahmeaufforderung führte. Das Szenario war charakterisiert durch einen plötzlichen Spurwechsel des Führungsfahrzeugs, der zu einem sichtbar werden einer Baustelle auf der Fahrspur führte, die ab diesem Zeitpunkt bei konstanter Geschwindigkeit nach 2.5, 3.0, oder 3.5 Sekunden erreicht werden würde. Das System initiierte jedoch gleichzeitig eine Verlangsamung der Geschwindigkeit, wodurch den Probanden effektiv eine Zeitspanne von 4.9, 5.7, oder 6.6 Sekunden für eine Reaktion zur Verfügung stand. Kurz vor dem Erreichen der Baustelle wurde die linke Spur durch einen überholenden Fahrzeugkonvoi blockiert, sodass Probanden nur stark bremsen konnten, um eine Kollision zu vermeiden.

Die Versuchspersonen bearbeiteten während der automatisierten Fahrt eine Abfolge von Nebenaufgaben, die mithilfe des Dreh-Drück-Stellers in der Mittelkonsole auf einem fahrzeuginternen Infotainment-System durchgeführt wurden. Die Aufgaben beinhalteten das Eingeben von Text, sowie das Suchen im Internet.

Anhand von Areas of Interest wurden während der automatisierten Fahrt Blickdauer und

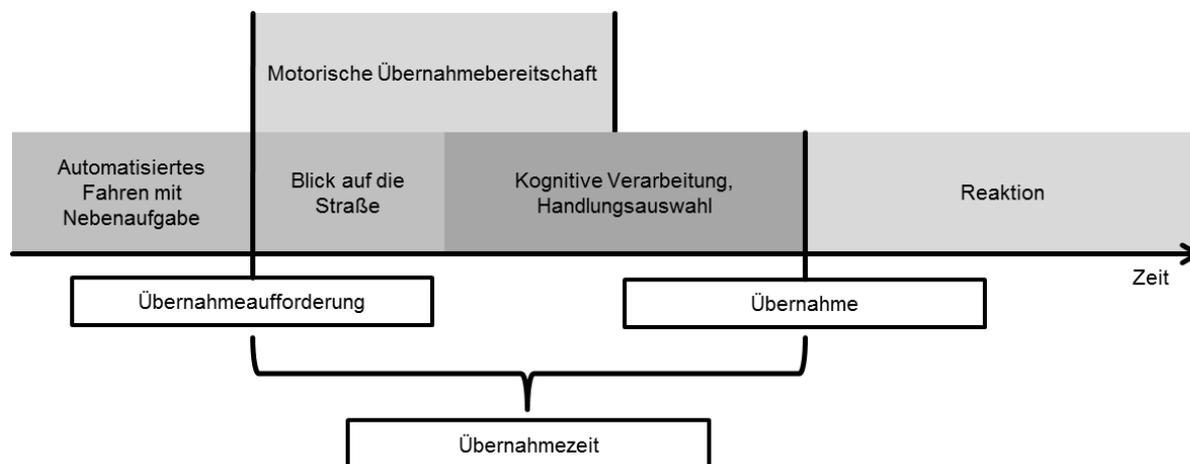


Abbildung 13: Modell der Prozesse während der Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer hochautomatisierten Fahrt mit einer Nebenaufgabe. Modifiziert nach Zeeb et al. (2015), S. 213.

Häufigkeit auf die Bereiche *Central Display*, *Windshield*, *Exterior Mirrors*, *Rearview Mirror* und *Instrument Cluster* analysiert. Ein Cluster-Algorithmus unterschied anhand dieser Daten drei Gruppen von Fahrern, die als *high risk* ($n = 20$), *medium risk* ($n = 36$), und *low risk* ($n = 33$) charakterisiert wurden, und sich hauptsächlich in der maximalen Dauer der Blickabwendungen von der Straße zum Infotainment-Display unterschieden.

Die Reaktionszeit auf eine Übernahmeaufforderung wurde auf Grundlage der angenommenen Prozesse während einer Übernahme (vgl. Abbildung 13), sowie dem Szenario entsprechend als Reaktion am Bremspedal ($> 10\%$ Veränderung zur Ruhstellung), als erster Hand-Kontakt am Lenkrad, sowie anhand der Blickzuwendung zur Straße definiert. Der erste Blick zur Straße erfolgte im Durchschnitt nach $M = 0.69$ ($SD = 0.20$) Sekunden. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den anhand des Eye-Trackings charakterisierten Risikogruppen. Die Fahrer benötigten im Durchschnitt $M = 1.14$ ($SD = 0.45$) Sekunden, um die Hände zum Lenkrad zu bewegen. Auch hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Risikogruppen. Hinsichtlich der Bremsreaktionszeit wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Risikogruppen gefunden, wobei die *high risk* Gruppe mit im Durchschnitt $M = 2.31$ ($SD = 0.67$) Sekunden später bremste als die *medium risk Gruppe*, und die *low risk* Gruppe ($M = 1.86$, $SD = 0.67$ Sekunden und $M = 1.63$, $SD = 0.50$ Sekunden) (vgl. Abbildung 14). Gleichzeitig kollidierten die Fahrer in der *high risk* Gruppe signifikant häufiger mit der Baustelle, bzw. mit dem überholenden Konvoi als die *low risk* Gruppe (45% vs. 15.2%).

Insgesamt zeigten sich in der Studie von Zeeb et al. (2015) längere Blickabwendungszeiten bei der Bearbeitung einer Nebenaufgabe in einer automatisierten Fahrt im Vergleich zu einer manuellen Fahrt ($M = 12.6$ vs. $M = 1.1$ Sekunden). Die Autoren argumentieren, dass daher das Blickverhalten ein essentieller Indikator für die Übernahmebereitschaft sowie den Fahrzustand beim hochautomatisierten Fahren ist, da fahrverhaltensbezogene Parameter

in dieser Phase weg fallen. Die Einschätzung des Risikoverhaltens der Fahrer mithilfe des verwendeten Algorithmus ließ Rückschlüsse auf das Bremsverhalten und die Kollisionswahrscheinlichkeit der Fahrer in einer Notfall-Situation zu, die sich in der Studie nicht durch Faktoren wie Alter, Fahrerfahrung oder Erfahrung mit Fahrerassistenzsystem erklären ließen. Die Autoren weisen darauf hin, dass die im Vergleich zu anderen Studien

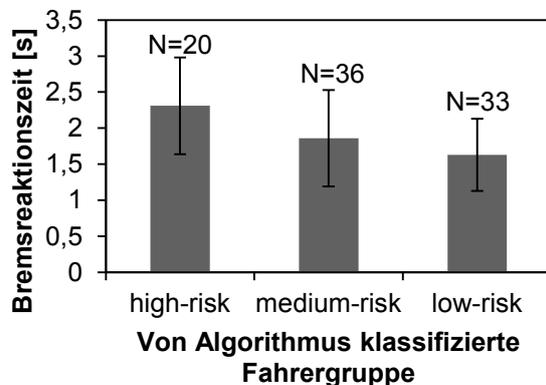


Abbildung 14: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichungen für die einzelnen Fahrergruppen. Modifiziert nach Zeeb et al. (2015), S. 218.

sehr kurzen Übernahmezeiten in der hohen Kritikalität der Notfall-Situation sowie der Vorerfahrung der Probanden durch zwei vorhergegangene unkritische Szenarien begründet liegen und nur als eingeschränkt repräsentativ für einen Übernahmeprozess zu bewerten sind. Zusätzlich wird die starke Abhängigkeit der Übernahmezeit von Versuchsvariablen (Komplexität der Situation, Schwierigkeit der Nebenaufgabe, Systemreliabilität) sowie von fahrerbezogenen Variablen (Demografie, Erfahrung, Fahrstil) betont.

Die Studie von Zeeb et al. (2015) findet Hinweise auf die Messbarkeit eines Risikoverhaltens von Fahrern während der Überwachung einer automatisierten Fahrt. Systeme zur Fahrerzustandsüberwachung haben großes Potential für die Gestaltung von adaptiver Automation, die auf die aktuellen Fähigkeiten und Zustände des menschlichen Automationspartners reagieren. Die Studie liefert Indizien dafür, dass durch die dynamische Gestaltung von Warnstrategien und die angepasste Präsentation von Informationen zum Übernahmezeitpunkt Reaktionszeiten verringert sowie die Übernahmequalität verbessert werden kann. Die Informationen für die dynamische Gestaltung der Warnstrategien müssen hierbei aus der Fahrerzustandsüberwachung, aus den Informationen über den Fahrer sowie aus den Informationen über das Fahrzeug (Qualität der Sensordaten, Fahrdaten) und die Fahrzeugumgebung (Komplexität der Situation, Wetterbedingungen, Verkehrsbedingungen) gesammelt und zu einer angepassten Übergabestrategie integriert werden.

3.2.21. Louw, Merat & Jamson (2015)

In der Studie *Engaging with highly automated driving: To be or not to be in the loop?* von Louw et al. (2015) wurde der Einfluss des Grades der Überwachung der Automation und der Komplexität einer Entscheidungssituation auf die Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer hochautomatisierten Fahrt untersucht.

N = 16 Versuchsteilnehmer im Alter von 19 bis 26 (M = 21.0. SD = 1.54) Jahren nahmen an einer Studie in einem statischen Fahrsimulator teil. Das Übernahmeszenario war eine dreispurige Straße, auf der die Automation mit einer Geschwindigkeit von 108 km/h fuhr. Die Übernahmeaufforderung war umgesetzt als ein einfaches Tonsignal und wurde ausgelöst

durch ein stationäres Fahrzeug auf der mittleren Spur, auf der sich zu diesem Zeitpunkt auch das Ego-Fahrzeug befand. Die Komplexität der Situation wurde manipuliert durch die Instruktion von Regeln für die Vermeidung einer Kollision mit dem stationären Fahrzeug:

- No rule: Versuchsteilnehmer konnten frei wählen, ob sie auf die linke, oder auf die rechte Fahrspur ausweichen.
- Congruous rule: Versuchsteilnehmer mussten basierend auf der Farbe des stationären Fahrzeugs entscheiden, ob sie nach links oder nach rechts ausweichen. Hierbei war die jeweils vorgegebene Richtung kongruent zu der Ausweichrichtung eines vorausfahrenden Fahrzeugs.
- Incongruous rule: Versuchsteilnehmer mussten basierend auf der Farbe des stationären Fahrzeugs entscheiden, ob sie nach links oder nach rechts ausweichen. Hier war die jeweils vorgegebene Richtung inkongruent zu der Ausweichrichtung eines vorausfahrenden Fahrzeugs.

Der Grad der Überwachung der Automation wurde über die Instruktion der Bearbeitung einer Nebenaufgabe manipuliert:

- Manual: Manuelle Baseline-Fahrt mit motorischer Kontrolle über das Fahrzeug und visueller Überwachung der Fahrt.
- Engaged automated: Versuchsteilnehmer überwachten die automatisierte Fahrt visuell, ohne dabei eine Nebenaufgabe zu bearbeiten. Die Hände und Füße waren hierbei nicht am Lenkrad, bzw. nicht an den Pedalen.
- Distracted automated: Versuchsteilnehmer bearbeiteten eine Nebenaufgabe (Text von einem Tablet-Computer laut vorlesen) und waren hierdurch visuell und kognitiv von der automatisierten Fahrt abgelenkt. Auch hier waren die Hände und die Füße nicht an den Stellteilen.

Die Autoren fanden erste Lenkeingriffe (Lenkwinkel $> 2^\circ$) nach sichtbar Werden des stationären Fahrzeugs/nach der Übernahmeaufforderung bei $M = 1.69$ Sekunden für die manuelle Baseline-Fahrt. Jeweils signifikant längere Zeiten wurden in der Bedingung *engaged automated* ($M = 2.47$ Sekunden) und *distracted automated* ($M = 2.18$ Sekunden) gefunden. Unterschiede zwischen den automatisierten Bedingungen waren nicht signifikant. Ein vollständiger Spurwechsel (definiert als alle vier Kanten des Ego-Fahrzeugs innerhalb der Ausweichspur) wurde nach $M = 4.52$ Sekunden für die manuelle Fahrt, nach $M = 4.19$ Sekunden für die Bedingung *engaged automated* sowie nach $M = 4.34$ Sekunden für die Bedingung *distracted automated* gefunden. Die Komplexität der Situation hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Dauer der Übernahme. Ein deutlicher Effekt wurde bei der maximalen lateralen Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs während des Spurwechsels beobachtet. Versuchspersonen produzierten signifikant höhere Beschleunigungswerte in den automatisierten Bedingungen im Vergleich zu der manuellen Fahrt.

Die Autoren bewerten die Ergebnisse hinsichtlich einer verzögerten ersten Reaktion auf ein Hindernis während einer automatisierten Fahrt unabhängig von dem Grad der Ablenkung durch eine Nebenaufgabe. Einen wichtigen Hinweis auf eine verschlechterte Qualität der Übernahme sehen die Autoren in der erhöhten maximalen Querbeschleunigung in den automatisierten Szenarien, die als eine hektischere und weniger abgesicherte Reaktion auf die Übernahmeaufforderung interpretiert wurde. Louw et al. (2015) diskutieren die Entwicklung eines Maßes für die Qualität der Übernahme unabhängig von der für die

Übernahme benötigten Zeit, das auch Unterschiede zwischen Übernahme-situationen mit unterschiedlichen Graden der Komplexität verlässlich differenzieren kann.

Die Ergebnisse von Louw et al. (2015) sind sowohl hinsichtlich der gemessenen Reaktionszeiten als auch hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse vergleichbar mit Gold et al. (2013b). Die Autoren finden deutliche Unterschiede zu einer manuellen Fahrt, bezogen auf die Übernahmezeit und die Übernahmequalität, auch noch in einer visuell überwachten automatisierten Fahrt. Die rein visuelle Überwachung der Situation ist also nicht ausreichend, um eine sichere Übernahme aus einer hochautomatisierten Fahrt zu gewährleisten. Louw et al. (2015) vermuten einen stärkeren Einfluss des motorischen Kontroll-Loops auf die Übernahme, und einen eher nachgeordneten Einfluss des kognitiven Kontroll-Loops.

3.2.22. Gold, Körber, Lechner & Bengler (2015)

Die Studie *Taking Over Control from Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations – The Role of Traffic Density* der Autoren Gold et al. (2015) untersucht den Einfluss von Verkehrsdichte auf die Geschwindigkeit und die Qualität der Übernahme der manuellen Kontrolle aus einer hochautomatisierten Fahrt.

In der Studie wurde mit $N = 72$ Versuchsteilnehmern im Alter von 19 bis 79 ($M = 45.0$, $SD = 22.2$) Jahren ein Szenario in einem statischen Fahrsimulator dargestellt, in dem eine Übernahme in drei unterschiedlichen Verkehrsdichten (0, 10 und 20 Fahrzeuge/km) sowie während der Bearbeitung eine Nebenaufgabe im Vergleich zu keiner Nebenaufgabe durchgeführt werden musste. Die Nebenaufgabe bestand aus einer verbalen Aufgabe, in der die Probanden Tiere erraten sollten, indem Sie den Versuchsleitern maximal 20 Fragen stellten, die diese mit Ja oder mit Nein beantworteten. Diese Aufgabe wurde von den Autoren als analog zu einem Telefongespräch eingeschätzt. Die Automation war auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h eingestellt. Die Übernahmeaufforderung wurde durch ein Unfallfahrzeug auf der Fahrspur ausgelöst, das mit einem Abstand von 7 Sekunden/233 Metern plötzlich eingeblendet wurde. Im selben Moment wurde eine akustische Warnung ausgegeben.

Gold et al. (2015) fanden für den Faktor Verkehrsdichte einen signifikanten Einfluss auf die Zeit bis zum Einleiten der ersten Reaktion auf die Übernahmeaufforderung. Für die unterschiedlichen Verkehrsdichten wurden mittlere Übernahmezeiten von $M = 2.57$ ($SD = 1.02$) Sekunden für die Bedingung ohne andere sichtbare Fahrzeug, $M = 3.42$ ($SD = 1.28$) Sekunden für eine Verkehrsdichte von 10 Fahrzeugen/km sowie eine mittlere Übernahmezeit von $M = 3.51$ ($SD = 1.20$) Sekunden für die höchste Verkehrsdichte von 20 Fahrzeugen/km gemessen. Die Übernahmequalität, gemessen als Längs- und Querschleunigungen, zeigte ein vergleichbares Bild in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte während der Übernahme. Ein Effekt der Nebenaufgabe wurde nur für die mittlere Time-to-Collision festgestellt.

Die Autoren schließen, dass bereits ein Verkehrsaufkommen 10 Fahrzeugen/km ausreicht, um deutliche negative Effekte der Verkehrsdichte auf die Reaktion bei der Übernahme der manuellen Steuerung auszulösen. Eine höhere Verkehrsdichte scheint sowohl ein längeres visuelles Absuchen der Umgebung auszulösen sowie eine längere kognitive Verarbeitungsdauer zu benötigen, bevor eine sinnvolle Reaktion an den Stellteilen ausgeführt werden kann. Diese Prozesse zeigen sich deutlich sowohl in einer verlängerten Reaktionszeit als auch in einer Verringerung der Übernahmequalität im Sinne von erhöhten Beschleunigungswerten und dichterem Auffahren auf andere Fahrzeuge. Gold et al. (2015)

argumentieren, dass mindestens drei Faktoren einen kritischen Einfluss auf die Dauer und die Qualität der Übernahme haben: die Situation/Verkehrsdichte, der Fahrerzustand, sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Moment der Übernahme.

3.2.23. Melcher, Rauh, Diederichs, Widroither & Bauer (2015)

In der Studie *Take-Over Requests for automated driving* von Melcher et al. (2015) wurde der Einfluss unterschiedlicher Orte und Modalitäten der Übernahmeaufforderungen auf die für eine Übernahme der manuellen Steuerung benötigte Zeit untersucht.

Die Studie wurde mit $N = 40$ Versuchsteilnehmern (17 weiblich) im Alter von 19 bis 53 ($M = 26$, $SD = 5.0$) Jahren durchgeführt. Als Übernahmeszenario wurde eine Baustelle mit veränderten Fahrbahnmarkierungen in einem statischen Fahrsimulator simuliert. Die Automation fuhr vor Erreichen des Übernahmeszenarios mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Während der automatisierten Fahrt sollten die Probanden eine Nebenaufgabe auf einem Smartphone ausführen (Quiz-Spiel). Die Übernahmeaufforderung wurde 10 Sekunden vor Erreichen der Systemgrenze (Beginn der Baustelle, der einen Fahrspurwechsel erforderlich machte) ausgegeben. Direkt auf die Übernahmeaufforderung folgend wurde die Effizienz der lateralen Kontrolle der Automation auf 30% reduziert und danach linear reduziert, während die longitudinale Kontrolle über das Fahrzeug bis zu dem Erreichen der Systemgrenze aktiv blieb. Die Automation reduzierte ab der Übernahmeaufforderung außerdem die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zunächst auf 80 km/h und dann auf 60 km/h, entsprechend der in dem Szenario platzierten Geschwindigkeitsbegrenzungen.

Als Übernahmeaufforderung wurde ein akustisches Signal in Kombination mit einer Anzeige auf dem Fahrzeug-HMI verwendet. Zusätzlich wurde in einem Szenario eine Warnung auf dem Bildschirm des Smartphones eingespielt, das die Nebenaufgabe unterbrach sowie in einem weiteren Szenario diese Warnung auf dem Smartphone durch einen Bremsruck ergänzt. Der Bremsruck wurde umgesetzt als schnelles Anheben der Räder des Fahrzeugs im Fahrsimulator.

Melcher et al. (2015) fanden für die Übernahmezeiten in allen Versuchsbedingungen eine Spanne von 1.4 Sekunden bis 6.7 ($M = 3.53$, $SD = 1.15$) Sekunden, wobei keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Übernahmezeiten in Abhängigkeit von den verschiedenen Präsentationen der Übernahmeaufforderung gefunden wurden.

Die Autoren schließen aus diesen Ergebnissen, dass eine Übernahmezeit von 10 Sekunden ausreichend ist um eine komfortable Übernahme durch die Fahrer zu gewährleisten. Fragebogendaten aus der Studie deuten allerdings darauf hin, dass ein Teil der Fahrer (~30%) sich eine noch längere Übernahmezeit für die dargestellte Übernahmesituation wünschten. Dass in der Studie keine hektischen Übernahmen festgestellt wurden sehen die Autoren als einen Hinweis darauf, dass das Wissen über eine immer gleiche Übernahmezeit den Fahrern dabei helfen kann im Falle einer Übernahme entspannt und bedacht zu reagieren. Zusätzliche Modalitäten und Präsentationsorte für die Übernahmeaufforderung scheinen die Reaktionszeiten nicht zu verbessern, können aber nach Melcher et al. (2015) zu einer höheren Akzeptanz von automatisierten Systemen beitragen.

3.3. Zusammenfassung der Literaturübersicht

Aus den dargestellten Studien lassen sich Hinweise zu Einflussfaktoren auf die Dauer und Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung aus einer hochautomatisierten Fahrt, sowie eine Abschätzung der Dauer des Vorgangs für eine sichere Übernahme ableiten. Bisherige Studien haben eine Reihe von Variablen identifiziert, die die Übernahmedauer und die Übernahmequalität beeinflussen. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass noch weitere, bislang nicht identifizierte Faktoren eine Rolle spielen können. Zusätzlich können bislang nicht untersuchte Interaktionseffekte durch die Kombination von Variablen in einem realen Szenario auftreten und die vom Fahrer benötigte Dauer für eine sichere Übernahme der Kontrolle beeinflussen.

Identifizierte und vermutete Variablen mit Einfluss auf die Übernahmezeit und Übernahmequalität lassen sich strukturieren als Umwelt-Variablen, Fahrer-Variablen, HMI-Variablen und Fahrzeug-Variablen. Bestätigte und vermutete beeinflussenden Faktoren aus der Literatur sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Beeinflussende Faktoren für die Dauer und Qualität der Übernahme der manuellen Kontrolle nach einer hochautomatisierten Fahrt.

Variablen	Beeinflussende Faktoren
Umwelt-Variablen	Charakteristik der Straße; gefahrene Geschwindigkeit; Verkehrsdichte; Krümmung der Straße; Wetter; Komplexität, Kritikalität und Charakteristik der Übernahmesituation; Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer
Fahrer-Variablen	Alter; Persönlichkeit; Fahrstil; Risikoempfinden; Vertrauen in die Automation; Komfortempfinden; Höhe und Art der Ablenkung durch eine Nebenaufgabe; Dauer der Ablenkung durch eine Nebenaufgabe; Grad der Überwachung der Automation; Dauer der automatisierten Fahrt; Erfahrungen mit Assistenzsystemen und Automation; Kenntnisse und Vermutungen über die Fähigkeiten der Automation
HMI-Variablen	Gestaltung des Übergangs von Automation zu manueller Steuerung; Gestaltung und Wahrnehmbarkeit der Übernahmeaufforderung; Interaktionsdesign für die Kooperation von Fahrer und Automation; Gestaltung der Nebenaufgabe
Fahrzeug-Variablen	Fähigkeiten der Automation; Art des Automations-Fehlers; von der Sensorik zur Verfügung gestellter Zeitrahmen für die Übernahme; zur Verfügung stehende Notfall-Systeme

Anmerkung: Zusammengefasst auf Grundlage von verwendeten Variablen und diskutierten Einflussfaktoren in Brandenburg & Skottke (2014); Damböck (2013); Damböck et al. (2012); Dogan et al. (2014); Gold et al. (2013a); Gold et al. (2013b); Helldin et al. (2013); Louw et al. (2015); Lorenz et al. (2014); Merat et al. (2013); Merat et al. (2014); Naujoks et al. (2014); Petermann-Stock et al. (2013); Petermann-Stock et al. (2015); Radlmayr et al. (2014); Shen & Neyens (2014); Strand et al. (2014); Tofetti et al. (2009); Wulf et al. (2013) und Zeeb et al. (2015).

Die Erkenntnisse aus den bisherigen Studien zu Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt werden im Folgenden noch einmal zusammenfassend dargestellt. Die verwendeten Studien sind zur besseren Übersicht am Ende des Abschnitts in Tabelle 5 anhand einiger relevanter Kriterien vergleichend aufgelistet.

Einen wichtigen Einfluss auf die Übernahme der Kontrolle scheint mitunter die Umwelt zu haben, in der die Übernahme stattfindet. Alle betrachteten Studien zu Übernahmezeiten konkretisieren die Fahrumgebung, in der die Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug zurück erlangen sollten. Dem aktuellen Fokus der Forschung entsprechend, wurden hauptsächlich Autobahn-Szenarien betrachtet, wobei hier zwischen Stau-Szenarien mit niedrigeren

Geschwindigkeiten bis 60 km/h (Dogan et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2015; Wulf et al., 2013) und Autobahn-/Highway-Szenarien mit höheren Geschwindigkeiten zwischen 100 – 130 km/h (Brandenburg & Skottke, 2014; Damböck et al., 2012; Damböck, 2013; Gold et al., 2013a; Gold et al., 2013b; Merat et al., 2013; Merat et al., 2014; Lorenz et al., 2014; Radlmayr et al., 2014; Shen & Neyens, 2014; Zeeb et al., 2015) unterschieden werden kann. In Helldin et al. (2013) und Strand et al. (2014) wurden Landstraßen-Szenarien in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 50-70 km/h umgesetzt. Ein ähnlicher Geschwindigkeitsbereich wird in Tofetti et al. (2009) für eine nicht weiter definierte dreispurige Straße betrachtet. Da sich die Art der Straße, auf der eine Übernahme stattfindet, direkt auf die von der Automation gefahrene Geschwindigkeit auswirkt, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Faktor unmittelbare Auswirkungen auf die Qualität der Übernahme hat.

Ein direkter Vergleich von Übernahmezeiten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten lag bisher nicht im Fokus der Forschung. Ein Vergleich der Reaktionszeiten auf Grundlage der Geschwindigkeitsbereiche in den vorliegenden Studien erscheint aufgrund der unterschiedlichen Experimental-Settings nicht sinnvoll. Allerdings kann die Geschwindigkeit direkt den Zeitraum beeinflussen, der von der Sensorik der Automation für eine Übernahme zur Verfügung gestellt werden kann. Eine längere zur Verfügung stehende Übernahmezeit scheint zwar die Reaktionszeit der Fahrer auf eine Übernahmeaufforderung zu verlängern, aber auch eine höhere Qualität der Reaktion sowie ein besseres Absichern von Spurwechseln zu bewirken (Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013; Zeeb et al., 2015). Allgemein lässt sich also vermuten, dass durch niedrigere Geschwindigkeiten bzw. durch das Verringern der Geschwindigkeit im Falle einer Übernahme eine Verbesserung der Übernahmequalität erreicht werden kann.

Ein weiterer Zusammenhang wird hinsichtlich der Komplexität der Übernahmesituation und der Übernahmezeit vermutet. Damböck et al. (2012) definieren die Komplexität der Übernahmesituation anhand der benötigten Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges (1982), bzw. anhand der benötigten Handlungsebenen nach Rasmussen (1986). Eine höhere Komplexität der Situation scheint zu einer Verlängerung der benötigten Zeit für eine qualitativ hochwertige Übernahme der manuellen Kontrolle über das Fahrzeug zu führen. Eine ähnliche Definition der Komplexität der Übernahmesituation und vergleichbare Ergebnisse finden sich in Radlmayr et al. (2014), in Naujoks et al. (2014) sowie in Gold et al. (2015). Keinen Effekt der Komplexität der Übernahmesituation fanden Shen & Neyens (2014). Um die Komplexität einer Situation zu variieren, wurde in den Studien die Höhe des Verkehrsaufkommens (bzw. die Anzahl der wahrzunehmenden Objekte in der Umgebung), die Anforderungen an die Fahrzeugstabilisierung nach der Übernahme, die Krümmung der Straße, das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Anzahl an möglichen Reaktionen in der Situation manipuliert.

Wichtig für die Reaktion auf eine Übernahmeaufforderung scheinen auch fahrerbezogene Variablen zu sein, die sich auf konstante Merkmale wie Demographie, Fahrstil, Persönlichkeitseigenschaften, Vertrauen in die Automation, Kenntnisse und Fähigkeiten des Fahrers sowie auf situative Merkmale wie den Grad der Ablenkung, die Aktivierung, und die Qualität der Überwachung der Automation durch den Fahrer beziehen. Hinweise auf einen Einfluss der demographischen Variablen „Alter“ finden sich in Petermann-Stock et al. (2015). Die Autoren zeigen, dass ältere Versuchspersonen zwar eine langsamere erste Reaktion auf eine Übernahmeaufforderung (im Sinne einer Bewegung zu den Stellteilen) zeigen, dies aber durch eine kürzere Reaktionszeit bis zum Einleiten einer Handlung im Vergleich zu den

jüngeren Fahrern ausgleichen. Ein Vergleich der Übernahmezeiten zwischen den Studien auf der Grundlage der Zusammensetzung der Stichproben erscheint aufgrund der sehr unterschiedlichen Untersuchungsziele und Hypothesen nicht sinnvoll. Zeeb et al. (2015) fanden eine Vorhersagbarkeit der Qualität der Reaktion bei einer Übernahme in Abhängigkeit des Blickverhaltens der einzelnen Versuchspersonen. Diese Ergebnisse deuten auf eine konstante Einflussgröße innerhalb einer Person hin, die den Charakter der Überwachung von automatisierten Systemen beeinflusst. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in Helldin et al. (2013), die das Vertrauen in die Automation als beeinflussende Variable für die Qualität der Übernahme diskutieren. Hier scheint außerdem die Dauer einer automatisierten Fahrt und die Art der Erfahrungen während dieser Fahrt eine Rolle zu spielen. Brandenburg & Skottke (2014) postulieren eine Verschlechterung der Übernahmequalität nach einer langen Phase der automatisierten Fahrt. In Zeeb et al. (2015) zeigte sich eine Verbesserung der Übernahmezeit in einer kritischen Situation nach mehreren unkritischen Übernahmen. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit der von Petermann-Stock et al. (2013) gefundenen Verbesserung der Übernahmezeit um ca. 1 Sekunde bei der zweiten kritischen Übernahmesituation im Vergleich zur ersten Übernahmesituation.

Ein essentieller Faktor für die Übernahmezeit und Übernahmequalität scheint jedoch die Art und Höhe der Ablenkung durch eine Nebenaufgabe zu sein. Es wird in einem Großteil der verwendeten Studien davon ausgegangen, dass Fahrer die Zeit der hochautomatisierten Fahrt für die Bearbeitung von Nebenaufgaben nutzen werden. Entsprechend sind verschiedenartige Nebenaufgaben Bestandteil der meisten Versuchspläne zur Ermittlung der Übernahmezeit aus einer hochautomatisierten Fahrt (siehe Spalte „Nebenaufgabe“ in Tabelle 5). Es wird davon ausgegangen, dass ein Fahrer während einer hochautomatisierten Fahrt den Zustand der Automation sowie seine Fahrumgebung gar nicht oder nur teilweise überwacht. Die Höhe der mentalen Beanspruchung durch die Nebenaufgabe sowie die beanspruchten Sinnes-Modalitäten variieren stark zwischen den einzelnen Studien. Die Nebenaufgaben werden in den vorliegenden Studien wahlweise auf dem internen Multimedia-System des Versuchsfahrzeugs, auf einem externen Gerät (Laptop, Tablet-PC) oder als von einem Bildschirm unabhängige Aufgabe (Zeitung lesen, Wissensfragen beantworten) umgesetzt.

Petermann-Stock et al. (2013) fanden einen Einfluss der Modalität der Nebenaufgabe auf die Übernahmedauer, wobei eine kognitiv-/visuell-/motorische Beanspruchung eine längere Übernahmezeit zur Folge zu haben scheint als eine akustisch-/sprachliche Beanspruchung. Radlmayr et al. (2014) fanden keinen messbaren Unterschied zwischen kognitiv-sprachlichen und kognitiv-visuellen Aufgaben. Für eine realistische Einschätzung einer maximalen Übernahmezeit sollte also eine Nebenaufgabe gewählt werden, die die Probanden sowohl visuell, als auch kognitiv und motorisch stark beansprucht. Um eine realitätsnahen Grad der Ablenkung zu erreichen, sollten hierfür Aufgaben gewählt werden, die möglichen Tätigkeiten von Fahrern in ihrem automatisierten Fahrzeug entsprechen. Eine hypothetische Liste solcher möglichen Tätigkeiten findet sich zum Beispiel bei Petermann-Stock et al. (2013).

Ein deutlicher Effekt zeigt sich außerdem für den Grad der Überwachung der automatisierten Fahrt, der in den Studien durch die Instruktionen induziert wurde. Nach der Definition von Gasser et al. (2012) wird während einer hochautomatisierten Fahrt keine dauerhafte Überwachung der Automation durch den Fahrer erwartet. In den Studien wurden die Probanden teilweise instruiert, den Fokus auf die Nebenaufgabe zu legen, da die Automation

in der Lage sei alle Situationen selbständig zu lösen (z.B. Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013b; Petermann-Stock et al., 2015). Teilweise hatten die Probanden jedoch auch die Möglichkeit, die Automation zu überwachen (z.B. Helldin et al., 2013; Strand et al., 2014; Zeeb et al., 2015). Auch wenn die simulierten Szenarien und Versuchsbedingungen zwischen diesen Studien einen direkten Vergleich nicht möglich machen, deuten die Vergleiche zwischen überwachten Fahrten und nicht überwachten Fahrten (Gold et al., 2013b; Shen & Neyens, 2014; Radlmayr et al., 2014) auf eine schnellere Reaktion aus einer überwachten Fahrt hin. Gleichzeitig stellen aber Radlmayr et al. (2014) fest, dass auch durch die Kombination einer hochautomatisierten Fahrt mit einer sprachlich-kognitiven Aufgabe, bei der eine visuelle Überwachung der Straße möglich ist, eine verlangsamte Reaktion im Vergleich zu einer manuellen Fahrt in Kombination mit einer sprachlich-kognitiven Aufgabe eintritt. Bei einer längeren Überwachung einer monotonen Fahrt ist zudem mit einer Abnahme der Vigilanz des Fahrers zu rechnen, wie sie schon in anderen Bereichen der Automations-Überwachung beobachtet wurde (z.B. Parasuraman & Davies, 1977).

Der Versuch, die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Automation sicherer und komfortabler zu gestalten, prägt den Fokus auf die Schnittstelle zwischen diesen Interaktionspartnern. Hierbei lassen sich die Ansätze kategorisieren in Veränderungen bei der Übernahme an sich, sowie Veränderungen bei der Gestaltung der Warnungen, Hinweise und Übernahmeaufforderungen. Ein Ansatz zur Veränderung der Übernahme wurde untersucht von Gold et al. (2013a), die der vollständigen Übernahme der manuellen Steuerung ein niedrigeres Niveau der Übernahme (motorisch oder visuell überwachen, aber nicht steuern) voranstellen. Die Autoren schließen, dass Automationseffekte hierdurch nur marginal verringert werden konnten. Im Vergleich zu einem direkten Übergang von einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung konnte die Übernahmezeit sowie die Übernahmequalität nicht messbar verbessert werden.

Vielversprechender scheinen Ansätze zu sein, die im Fall einer Übernahme effizient warnen, und den Fahrer über die Situation, seine Umgebung, seine Optionen, sowie den Zustand der Automation informieren. In den Studien verwendete Warnungen und Hinweise waren entweder visuell, akustisch, sprachlich oder haptisch/taktil, sowie Kombinationen dieser Modalitäten (vergleiche Tabelle 5, Spalte „Art der Übernahmeaufforderung“). Unterschiede zwischen Charakter und Art der Warnungen wurden in Lorenz et al. (2014), Naujoks et al. (2014), Petermann-Stock et al. (2015), Tofetti et al. (2009), sowie Wulf et al. (2013) betrachtet. Insgesamt schließen die Autoren, dass multimodale Hinweisreize die Reaktion verbessern können. Außerdem scheinen akustische Warnungen bei gegebener Wahrnehmbarkeit das Potenzial zu besitzen auch bei starker, häufig visueller Ablenkung, durch die Nebenaufgabe eine Reaktion hervorzurufen. Petermann-Stock et al. (2015) sowie Naujoks et al. (2014) empfehlen eine eskalierende oder kaskadierende Warnstrategie unter Hinzunahme von Modalitäten und eine ansteigende Intensität der Signale bei zunehmender Dringlichkeit der Reaktion. Positive Effekte bezüglich einer Orientierungsreaktion konnten in dieser Studie auch durch die Verwendung taktiler Hinweisreize beobachtet werden.

Ein Verbesserung des Situationsbewusstseins der Fahrer in einer Übernahmesituation sowie die angemessene Kalibrierung des Vertrauens in die Automation scheinen wichtige Ansätze zur Verbesserung der Geschwindigkeit und Qualität der Reaktion in einer Übernahmesituation zu sein. Ein verbessertes Situationsbewusstsein konnte in Lorenz et al. (2014) durch die Präsentation von Informationen über einen sicheren Fahr-Korridor unter Verwendung von Augmented Reality demonstriert werden. Die Probanden folgten dem projizierten Korridor, wodurch sich geringere Spurabweichungen sowie geringere

Querbeschleunigungen ergaben. Gleichzeitig zeigten die Probanden allerdings hier auch ein für Automation typisches hohes Complacency-Potenzial (Parasuraman & Manzey, 2010) und vernachlässigten die Absicherung der vorgeschlagenen Korridore. Hier wird deutlich, dass eine angemessene Kalibrierung des Vertrauens in die Automation für die Sicherheit des hochautomatisierten Fahrens essentiell ist. Helldin et al. (2013) präsentieren einen Ansatz für die Kalibrierung des Vertrauens über eine visuelle Anzeige der Unsicherheit der Automation in jeder Situation, der die Fähigkeit zur Übernahme der manuellen Kontrolle in einer kritischen Situation zu verbessern scheint.

Auch Fahrzeug-Variablen können den Übernahmeprozess beeinflussen. Ein essentieller Faktor ist hierbei die Zeit, die die Sensorik des Fahrzeugs in verschiedenen Situationen zur Verfügung stellen kann. Außerdem scheinen die Fähigkeiten der Automation wichtig zu sein, die zu erwartende Häufigkeit von Fehlern oder Ausfällen, sowie die technischen Limitationen bei der Handhabung von unerwarteten Szenarien, die zu der Kalibrierung des Vertrauens und zu einem mentalen Modell der Automation innerhalb der Nutzer führen. In den vorliegenden Studien wurden hierbei unterschiedliche fiktive automatisierte Fahrzeuge als Grundlage verwendet, die sich in ihrem Verhalten an Systemgrenzen sowie in der Verfügbarkeit von Notfall-Systemen unterscheiden. In einem Großteil der Studien wird davon ausgegangen, dass die Automation jederzeit in der Lage ist in einen risikominimalen Zustand zurückzukehren (z.B. Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013b; Petermann-Stock et al., 2015; Zeeb et al., 2015), zum Beispiel durch einen Not-Halt auf dem Seitenstreifen. Einige Studien gehen jedoch auch von einem automatisierten Fahrzeug aus, dessen System sich bei Erreichen einer Systemgrenze sofort oder zumindest graduell abschaltet (z. B. Helldin et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2013; Strand et al., 2014). Die Studien liefern hierzu keine vergleichbaren Ergebnisse hinsichtlich der Übernahmezeit und Übernahmegüte. Strand et al. (2014) konnten zeigen, dass ein vollständiger Ausfall der Automation für schnellere Reaktionen sorgt als ein gradueller Ausfall. Dies sollte jedoch nicht als Hinweis auf einen Vorteil eines unmittelbar und vollständig abschaltenden Systems interpretiert werden, sondern als ein Effekt der höheren Kritikalität der Situation. Vergleichbar ist dies zum Beispiel mit den Ergebnissen von Damböck et al. (2012), die auf eine Verringerung der Übernahmezeit in einer kritischeren Situation hinweisen, aber auch auf eine gleichzeitige Verschlechterung der Übernahmegüte. Letztlich liefert nur die Fähigkeit einer Automation, in einen risikominimalen Zustand zurückzukehren, eine ausreichende Sicherheit in einer Situation, in der der Fahrer zu spät oder gar nicht eingreift.

Zusammenfassend scheinen sich die deutlichsten Einflüsse auf Übernahmezeit und Übernahmegüte aus der Komplexität der Übernahmesituation, aus der Gestaltung der Übernahmeanforderung sowie aus der zum Zeitpunkt der Übernahmeanforderung bearbeiteten Nebenaufgabe zu ergeben. Auf Grundlage der vorliegenden Studien wird in Abhängigkeit von diesen Parametern eine durchschnittliche Übernahmezeit zwischen ca. 3 bis 8 Sekunden vermutet, wenn als Übernahmezeitpunkt der Beginn einer Reaktion an den Stellteilen des Fahrzeugs definiert wird. Die große Spanne ergibt sich hierbei aus der Variation der als einflussreich identifizierten Variablen in der Übernahmesituation. Entsprechend werden hier auch die Stellschrauben für eine effektive Verkürzung der Übernahmezeit sowie eine Verbesserung der Übernahmegüte vermutet. Ein längerer Zeitraum für eine erfolgreiche Übernahme, wie er zum Beispiel in Merat et al. (2013), Merat et al. (2014) sowie Brandenburg und Skottke (2014) gefunden wurde, könnte bei einer abweichenden Definition des Kriteriums für eine erfolgreiche Übernahme der manuellen Steuerung entstehen, wie zum Beispiel die Rückkehr des Fahrerhaltens zu einem Baseline-Niveau.

Aus den vorliegenden Studien lassen sich Vorschläge für die Gestaltung zukünftiger Studien zur Ermittlung von Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt ableiten, die eine höhere Vergleichbarkeit der Übernahmezeiten gewährleisten.

- Das genaue Festlegen und Berichten von Kriterien für den Beginn der Zeitmessung, sowie für das Ende der Zeitmessung ist Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse.
- Als Beginn der Zeitmessung sollte der Zeitpunkt der Präsentation der Übernahmeaufforderung gewählt werden.
- Als Ende der Zeitmessung sollten mehrere Zeitpunkte gewählt werden, die unterschiedliche Phasen einer Übernahme repräsentieren. Hierbei sollte modellgeleitet vorgegangen werden. Entsprechende Modelle werden von Damböck (2012), Petermann-Stock et al. (2015), sowie Zeeb et al. (2015) vorgeschlagen. Vorgeschlagene Zeitpunkte für Zeitmessungen der Autoren, ergänzt durch eigene Vorschläge, sind:
 - Orientierungsreaktion: Erstes Aufblicken von der Nebenaufgabe; Erste Fixation auf die Straße; Physiologische Reaktion auf die Warnung.
 - Motorische Handlungsbereitschaft: Hände am Lenkrad; Füße an den Pedalen.
 - Mentale Handlungsbereitschaft: Absicherung einer bevorstehenden Reaktion durch Blicke in die Seitenspiegel/Rückspiegel, sowie durch das Erfassen aller relevanten Verkehrsteilnehmer und Objekte in der Fahrumgebung.
 - Handlungseinleitung: Erste messbare Reaktion an den Stellteilen. Beispielsweise definiert als Veränderung der Bremspedalstellung um 10%, und als Veränderung des Lenkradwinkels um 2°, oder als bewusstes Abschalten der Automation.
 - Handlungsabschluss: Abschluss einer der Situation angemessenen Handlung. Zum Beispiel definiert als abgeschlossener Spurwechsel, Einhalten eines Mindestabstands zu einem Hindernis, oder das Halten des Fahrzeugs innerhalb einer Fahrspur.
 - Fahrzeugstabilisierung: Stabilisierung des Fahrzeugs im Vergleich zu einer manuell gefahrenen Baseline. Zum Beispiel definiert als Standardabweichung der Spurhaltung (Standard Deviation of Lane Position), oder dargestellt als Trajektorien und Beschleunigungswerte während eines Spurwechsels.
 - Unmittelbares Fahrerverhalten: Verhalten des Fahrers nach einer Übernahme für einen Zeitraum X. Beobachtung des Blickverhaltens und Fahrverhaltens des Fahrers in dem Zeitraum nach einer Übernahme von bis zu 5 Minuten.
 - Langfristiges Fahrerverhalten: Verhalten des Fahrers nach längerfristiger Gewöhnung an die Fähigkeiten der Automation.

Der Fahrer sollte für die Messung einer Übernahmezeit so vollständig und realistisch wie möglich „out-of-the-loop“ genommen werden. Als eine realistische, maximale Beanspruchung wird eine visuell, kognitiv sowie motorisch beanspruchende Aufgabe mit sprachlichen Elementen und potentieller Maskierung auditiver Reize vermutet, die zusätzlich für den Fahrer motivierend und involvierend ist.

Eine Übernahmeaufforderung sollte mindestens als Kombination aus einem visuellen und einem auditiven Reiz gestaltet sein, um die Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit zu gewährleisten und realistischen Übernahmeaufforderungen im Fahrzeug zu entsprechen.

Übernahmeszenarien sollten einen realistischen Komplexitätsgrad besitzen, der schwierigen Situationen während einer Realfahrt entspricht. Für die Ermittlung einer maximalen Übernahmezeit wird ein Szenario mit hoher Verkehrskomplexität, schlechten Sichtbedingungen, einer gekrümmten Straßenführung sowie einer Verfügbarkeit von mehreren Handlungsoptionen zur Lösung der Situation vorgeschlagen.

Tabelle 5: Studienüberblick zu Übernahmezeiten aus einer hochautomatisierten Fahrt zur manuellen Steuerung.

Studie	Vergleichskriterien						
	Mittlere Übernahmezeit	Nebenaufgabe	Simulierte Fahrumgebung	Simulierte Übernahme-situation	Art der Übernahmeaufforderung	Art des Fahr-simulators	Zusammensetzung der Stichprobe
Tofetti et al. (2009)	~3.6 (SD ~ 0.5) – 5.1 (SD ~ 1.1) Sekunden	Interaktion mit fahrzeuginternem Multimedia-System	Dreispurige Straße, 70 km/h, mittlere Verkehrsdichte	Ausfahrt aus dedizierter Fahrspur / Ausfall der Verkehrsinfrastruktur / Systemfehler	Visuell + akustisch / visuell + sprachlich	Dynamisch	N = 24, 21 – 46 Jahre
Damböck et al. (2012)	6 – 8 Sekunden	Zweidimensionale Trackingaufgabe mit Spielecontroller auf Laptopbildschirm	Dreispurige Autobahn, 100 km/h, mittlere Verkehrsdichte	Fehlende Fahrbahnmarkierung / Fahrbahnverengung / Auswahl von Zielfahrstreifen	Akustisch	Statisch	N = 32, 22 – 73 Jahre (M = 42.5, SD = 15.8)
Merat et al. (2013)	~30 Sekunden	Sprachliches Erraten von Objekten (Ja/Nein-Fragen)	Dreispurige Straße, 110 km/h, geringe Verkehrsdichte	Hinweisschild Spurwechsel aufgrund von Unfall	Visuell	Dynamisch	N = 50, 28 – 68 Jahre (M = 47.38, SD = 10.37)
Damböck (2013)	~2.5 – 6 Sekunden	Zweidimensionale Trackingaufgabe mit Spielecontroller auf Laptopbildschirm	Dreispurige Autobahn, 100 km/h, mittlere Verkehrsdichte	Fehlende Fahrbahnmarkierung / Fahrbahnverengung / Auswahl von Zielfahrstreifen	Akustisch	Statisch	N = 32, 22 – 73 Jahre (M = 42.5, SD = 15.8)
Gold et al. (2013a)	3.94 (SD = 0.64) – 4.42 (SD = 0.68) Sekunden	Surrogate Reference Task auf Tablet-Computer / Mittelkonsole	Dreispurige Autobahn, 120 km/h	Pannenfahrzeug und Person auf Seitenstreifen / Baustelle auf Seitenstreifen	Aufforderung zur visuellen / visuell-motorischen Überwachung: visuell + akustisch	Dynamisch	N = 32, 19 – 57 Jahre (M = 27.6, SD = 8.7)

Studie	Mittlere Übernahmezeit	Nebenaufgabe	Simulierte Fahrumgebung	Simulierte Übernahme-situation	Art der Übernahmeaufforderung	Art des Fahr-simulators	Zusammensetzung der Stichprobe
Gold et al. (2013b)	2.27 (SD = 0.66) – 3.65 (SD = 1.33) Sekunden	Surrogate Reference Task auf Tablet-Computer	Dreispurige Autobahn, 120 km/h	Unfallstelle auf der Fahrspur	Akustisch	Dynamisch	N = 45, 19 – 57 Jahre (M = 27.6, SD = 8.7)
Helldin et al. (2013)	1.9 – 3.2 Sekunden	Freiwilliger Gebrauch von zur Verfügung gestellter Zeitschrift / Essen	Einspurige Landstraße mit Schnee,	Steigende Intensität des Schneefalls, Fähigkeiten der Automation abhängig von Wetterbedingungen	Informationen über Unsicherheits-Niveau der Automation / visuell	Statisch	N = 59, 21 – 60 Jahre (M = 41.2)
Petermann-Stock et al. (2013)	2.03 (SD = 0.68) – 3.35 (SD = 1.60) Sekunden	Wissensquiz, verschiedene Ausprägungen (akustisch, akustisch+visuell, akustisch+visuell+motorisch)	Zweispurige Autobahn, 130 km/h, Übergabe bei 35 km/h, hohe Verkehrsdichte/Stau	Stark verlangsames Führungsfahrzeug im Stau	Akustisch + visuell	Statisch	N = 72; M = 47 (SD = 4) Jahre
Wulf et al. (2013)	1.16 (SD = 0.30) – 19.97 (SD = 4.47) Sekunden	Interaktion mit fahrzeuginternem Multimedia-System über Touchscreen	Mehrspurige Autobahn, Stau-Szenario	Stau; bremsendes Führungsfahrzeug / Plötzlicher Spurwechsel / Hindernis auf Fahrspur / Systemfehler	Akustisch + HMI-Konzepte „Totmannschalter“ / Videobild der Fahrbahn	Statisch	N = 90, 18 – 60 (M = 36.40, SD = 9.08) Jahre
Brandenburg & Skottke (2014)	Automationseffekte noch nach ca. 5 – 6 Minuten	Keine	Autobahnfahrt im Konvoi, 100 km/h	Unkritische Übernahme-situation	Sprachlich	Dynamisch	N = 19, 22 – 43 (M = 29) Jahre
Dogan et al. (2014)	2.19 (SD = 0.91) – 2.48 (SD = 0.89) Sekunden	Interaktion mit Smartphone / Lesen einer Zeitschrift	Zweispurige Autobahn, Stau-Szenario mit 3.6 – 50 km/h	Stau; unerwartete Übernahme bei 35 km/h / erwartete Übernahme bei 50 km/h	Akustisch	Dynamisch	N = 21, M = 38.52 (SD = 9.04) Jahre

Studie	Mittlere Übernahmezeit	Nebenaufgabe	Simulierte Fahrumgebung	Simulierte Übernahme-situation	Art der Übernahmeaufforderung	Art des Fahr-simulators	Zusammensetzung der Stichprobe
Lorenz et al. (2014)	2.86 (SD = 0.77) – 3.03 (SD = 0.86) Sekunden	Surrogate Reference Task auf einem Tablet-Computer in der Mittelkonsole	Dreispurige Autobahn, 120 km/h	Unfallstelle auf der Fahrspur	Visuell + akustisch + Augmented Reality Konzepte	Dynamisch	N = 46, M = 31.7 (SD = 10.1) Jahre
Merat et al. (2014)	Von der Baseline abweichendes Fahrerverhalten für 35 – 40 Sekunden nach Übernahme	Keine	Dreispurige Straße, ca. 113 km/h	Verengung der Fahrbahn von drei auf eine Spur	Visuell, außerhalb des Fahrzeugs (dynamisches Straßenschild); Rückholung in Intervallen / auf Grundlage von Blickdaten	Statisch	N = 37, 28 – 67 (M = 47.35, SD = 10.33) Jahre
Naujoks et al. (2014)	2.29 – 6.19 Sekunden	Lesen von Passagen in einer Zeitung	Dreispurige Autobahn, 50 km/h, hohe Verkehrsdichte	Fehlende Fahrbahnmarkierung / Beginn einer Baustelle / Übernahme ohne ersichtlichen Grund	Visuell / visuell + akustisch	Dynamisch	N = 16
Radlmayr et al. (2014)	1.84 – 2.38 Sekunden	Visuell (Surrogate Reference Task) / kognitiv-sprachlich (n-back)	Dreispurige Autobahn, 120 km/h, geringe Verkehrsdichte	Hindernis auf der Fahrspur, teilweise mit Fahrspurwechsel vermeidendem Verkehr	Visuell + akustisch	Dynamisch	N = 48, M = 33.5 (SD = 9.0) Jahre
Shen & Neyens (2014)	1.66 Sekunden	Keine	Mehrspurige Straße, 105 km/h	Grade Straße, kein Verkehr / Grade Straße, Verkehr / kurvige Straße, Verkehr	Akustisch	Statisch	N = 48, 18 – 25 (M = 21.9, SD = 2.99) Jahre

Studie	Mittlere Übernahmezeit	Nebenaufgabe	Simulierte Fahrumgebung	Simulierte Übernahme-situation	Art der Übernahmeaufforderung	Art des Fahr-simulators	Zusammensetzung der Stichprobe
Strand et al. (2014)	1.85 (SD = 0.46) – 2.57 (SD = 1.05) Sekunden	Keine	Einspurige Landstraße, Stau-Szenario, 50 – 70 km/h	Unterschiedliche Schweregrade von Bremsfehlern des ACC bei stark bremsendem Führungsfahrzeug	Keine	Dynamisch	N = 36, 25 – 64 (M = 43.2, SD = 9.6) Jahre
Petermann-Stock et al. (2015)	~1.8 - ~2.3 Sekunden; Empfehlung 2.2 – 5.8 Sekunden	Wissensquiz auf Laptop mit Touchscreen	Staufahrt auf einer Autobahn, max. 60 km/h	Annäherung an Kurve / Stark bremsendes Führungsfahrzeug	visuell + akustisch / sprachlich / haptisch / optisch, mit variierter Warnintensität	Dynamisch	N = 108, 25 – 70 Jahre
Zeeb et al. (2015)	1.63 (SD = 0.50) – 2.31 (SD = 0.67) Sekunden	Interaktion mit fahrzeuginternem Multimedia-System über Dreh-Drücksteller	Zweispurige Autobahn, 120 km/h	Baustelle auf der Fahrspur, überholender Konvoi auf der linken Spur	Visuell + akustisch	Dynamisch	N = 89, 20 – 72 (M = 42.0, SD = 13.0) Jahre
Louw et al. (2015)	~4.19 – 4.52 Sekunden	Vorlesen eines Textes von einem Tablet-Computer	Dreispurige Straße, 108 km/h	Stationäres Fahrzeug auf der Mittelspur, Ausweichen auf Grundlage einer Entscheidungsregel	Akustisch	Statisch	N = 16, 19 – 26 (M = 21.0, SD = 1.5) Jahre
Gold et al. (2015)	2.57 (SD = 1.02) – 3.51 (SD = 1.20) Sekunden	Verbales Beantworten von 20 Ja/Nein Fragen	Dreispurige Autobahn, 120 km/h	Unterschiedliche Grade von Verkehrsdichte; Unfallfahrzeug auf Fahrspur	Akustisch	Statisch	N = 72, 19 – 79 (M = 45.0, SD = 22.2) Jahre
Melcher et al. (2015)	3.53 (SD = 1.15) Sekunden	Wissensquiz auf einem Smartphone	Zweispurige Autobahn, 100 km/h	Baustelleneinfahrt mit Verringerung der verfügbaren Fahrspuren	Akustisch + Visuell + Bremsruck	Statisch	N = 40, 19 – 53 (M = 26.0, SD = 5.0) Jahre

Anmerkung: Berichtete Übernahmezeiten in der Tabelle sind teilweise in sehr unterschiedlichen Versuchsbedingungen entstanden und daher nur eingeschränkt vergleichbar. Die hier wiedergegebenen Vergleichskriterien sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur eine Auswahl der in den Versuchen vorkommenden Variablen. Einzelne Versuche unterschieden sich auf zusätzlichen Dimensionen. Fehlende Angaben in der Tabelle konnten für die jeweiligen Studien nicht auf der Grundlage der Veröffentlichungen ermittelt werden.

4. Studie zur Dauer der Wiederherstellung vollständiger motorischer und kognitiver Kontrolle über das Fahrzeug nach einer hochautomatisierten Fahrt

Aufbauend auf dem aus der Literaturanalyse ermitteltem Forschungsbedarf wurde eine empirische Studie konzipiert und durchgeführt, die als Fokus die Dauer der Wiederherstellung einer vollständigen motorischen und kognitiven Kontrolle über ein Fahrzeug nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt hatte. Hierbei wurde besonders der Effekt eines Fahrers „out-of-the-loop“ analysiert. Der Fahrer war also zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung in einigen Versuchsbedingungen vollständig aus der Fahraufgabe genommen und durch eine Nebenaufgabe abgelenkt.

In der Studie wurden sowohl subjektive Parameter der Übernahme untersucht – das Vertrauen in die Automation, das Risikoempfinden sowie der Komfort – als auch objektive Parameter wie das Fahrverhalten, Blickverhalten und die Reaktionszeiten betrachtet. Das Ziel der Studie war die Definition eines sicheren und komfortablen Zeitraums, den ein Fahrzeug einem Fahrer in einer Übernahmesituation zur Verfügung stellen muss. Es wurde von einer Abhängigkeit der Länge dieses Zeitraums von der Komplexität der Übernahmesituation sowie der Art, und Komplexität der Nebenaufgabe ausgegangen (siehe Kapitel 3.3) und diese Variablen entsprechend systematisch variiert. Auf diese Weise können Empfehlungen für einen angemessenen Bereich für eine Übernahmezeit gegeben werden. Zu beachten ist hierbei, dass die Zeiten in einem Fahrsimulator ermittelt wurden und somit nur als Annäherung an eine tatsächliche Übernahme dienen können. Weiterhin ist zu beachten, dass alleine die Übernahmezeit kein ausreichendes Maß für die Qualität einer Übernahme bieten kann. Die Zeiten sind immer in Verbindung mit weiteren Maßen für die Übernahmegüte zu sehen, zu denen unter anderem die Qualität der Absicherung der Übernahme sowie die Vollständigkeit des Situationsbewusstseins während der Übernahme zählen. Auch diese qualitativen Faktoren der Übernahme wurden in der vorliegenden Studie anhand einiger ausgewählter Fahrdaten untersucht.

4.1. Motivation

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Studien machen zunächst deutlich, dass für den Bereich des automatisierten Fahrens zwar teilweise auf Erkenntnisse aus anderen Automations-Bereichen zurückgegriffen werden kann, sich aber durch die Situation des Fahrers im Auto einige deutliche Unterschiede ergeben, die eine separate Untersuchung dieser Phänomene notwendig machen. Typische Automationseffekte in Bezug auf das Vertrauen in die Automation, die Vigilanz bei der Überwachung von Automation und die Complacency finden sich auch bei der Übernahme der manuellen Steuerung im Fahrzeug wieder. Es ergeben sich jedoch zusätzlich spezielle Herausforderungen durch die vergleichbar kurzen Übernahmezeiten, die vollständige Ablenkung von der Fahraufgabe sowie das fehlende Training der Fahrer für diese Art von Situationen.

Gleichzeitig sind Automobilhersteller und Zulieferer aktuell sehr aktiv mit der Entwicklung von Automation für das Fahrzeug beschäftigt. Trimble et al. (2014) stellen in der Entwicklung befindliche Automation und die Motivation der Hersteller für die Entwicklung dieser Funktionen dar. Laut der Autoren sind die Haupt-Motivatoren für die Hersteller das Bereitstellen von Komfort („Convenience“) für den Fahrer, die Erhöhung der Sicherheit der Fahrer („Safety“), die Verbesserung der Mobilität von bestimmten Fahrergruppen („Mobility“) und das Ermöglichen der Nutzung der automatisierten Phasen für die Durchführung anderer Aufgaben („Enable Multitasking“). Um diese Ziele mithilfe von Automation zu erreichen

werden Assistenzsysteme für Notbremsungen, Engstellen, Parken, Staufahrten sowie Autobahn- und Stadtfahrten entwickelt. Es ist somit unerlässlich, dass Auswirkungen von Automation im Fahrzeug untersucht werden um Hinweise und Unterstützung für die Entwicklung der Hersteller zu liefern.

Auf Grundlage der Literaturanalyse in Kapitel 3.3 wurden die Einflussfaktoren „Komplexität der Übernahme situation“ und „Komplexität der Nebenaufgabe“ als entscheidend für die Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt identifiziert. Aus den bislang veröffentlichten Studien wird deutlich, dass noch keine einheitliche Methodik für die Evaluation von Übernahmezeiten etabliert werden konnte. Die vorhandenen Studien zu dieser Thematik verwenden verschiedenste Szenarien, die sich teilweise im Aufbau der Situation, in der Komplexität sowie in den Gründen für die Übernahmeaufforderung deutlich unterscheiden. Zwar wird in allen vorgestellten Studien eine als Übernahmezeit definierte Zeitspanne gemessen, allerdings unterscheiden sich auch hier die Studien deutlich in ihrer Definition sowohl der Zeit, die als Beginn der Übernahme, als auch der Zeit die als Abschluss der Übernahme betrachtet werden. Einige Erkenntnisse deuten außerdem bereits darauf hin, dass neben der Übernahmezeit auch die Analyse der Qualität der Übernahme nicht vernachlässigt werden darf. Nur so lässt sich letztlich einschätzen ob eine gemessene Übernahmezeit ausreichend lang war um die Kontrolle über das Fahrzeug zurück zu erlangen, oder ob die Übernahmezeiten zu entscheidenden Teilen aus den Begrenzungen des Versuchsszenarios entstanden sind.

Zusätzlich erschwert wird die Interpretation der vorhandenen Studien durch die Limitationen einiger der berichteten statistischen Kennwerte. Häufigstes Maß für das Berichten der Übernahmezeit ist der Mittelwert, häufig in Verbindung mit der Standardabweichung. Durch die Betrachtung dieser beiden Werte lassen sich zwar erste Rückschlüsse auf die vermutete Dauer einer Übernahme der Steuerung in einer realen Situation ziehen. Die Angaben sind jedoch nur dann sinnvoll interpretierbar wenn die tatsächlichen Übernahmezeiten normalverteilt um den Mittelwert streuen. Die Verwendung des Mittelwertes als Orientierung für die Einschätzung von Übernahmezeiten hat hiermit das Potenzial Extremwerte unsichtbar zu machen und den Blick auf die statistische Verteilung der Werte zu versperrern.

Die vorliegende Studie verfolgte entsprechend das Ziel zunächst Übernahmeszenarien zu entwickeln die unter den derzeit bekannten Voraussetzungen technisch realistisch und relevant sind. Außerdem sollten Übernahmezeiten in Abhängigkeit von als relevant vermuteten Parametern der Übernahme situation betrachtet und mit qualitativen Kriterien der Übernahme in Verbindung gebracht werden. Hierfür wurden verschiedene Maße für die Qualität der Übernahme definiert und ihr Nutzen als Hinweis auf eine Qualität der Übernahme untersucht. Die Testfahrer wurden mit verschiedenen Nebenaufgaben von der automatisierten Fahrt abgelenkt, wobei ein besonderer Fokus auf intrinsisch motivierende Nebenaufgaben gelegt wurde, wie sie vermutlich auch in zukünftigen automatisierten Fahrzeugen von Fahrern aufgenommen werden. Es werden Vorschläge für eine Form der Darstellung gegeben, die die Einschätzung der Übernahmezeiten im Kontext von Take-Over-Requests unter Berücksichtigung der Verteilung der Reaktionszeiten möglich machen könnten. Auf dieser Grundlage werden Einschätzungen über die Zeit gegeben, die die Automation dem Fahrer im Falle einer Übernahme bereitstellen muss. Diese Zeit wird zu der Komplexität der Fahrsituation und der Komplexität der Nebenaufgabe in Verbindung gesetzt und mit den Zeiten in manuellen Fahrten verglichen.

4.2. Fragestellungen, Hypothesen und Versuchsdesign

Entsprechend dieser Motivation wurden Fragestellungen und Hypothesen entwickelt die eine genauere Untersuchung der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Phase der Automation möglich machen. Als übergeordnete Fragestellung sollte in der vorliegenden Studie untersucht werden wie lange ein Fahrer nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt bei dem Erreichen einer Systemgrenze und nach dem Ausgeben einer Übernahmeaufforderung durch das Fahrzeug braucht um die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Hierfür sollte geklärt werden welche Zeiten und andere Maße sich zur Messung und Darstellung dieser Übernahmezeit eignen. Entsprechend der als besonders beeinflussend für die Dauer der Übernahme vermuteten Faktoren *Art der Nebenaufgabe* und *Art der Situation* in der die Übernahme stattfindet, wurden diese Faktoren in der Studie systematisch variiert und untersucht. Aus den Fragestellungen ergaben sich letztlich die folgenden Forschungshypothesen für die Untersuchung:

H1: Die Art der Nebenaufgabe vor der Übernahmesituation führt zu unterschiedlichen Leistungen in der Übernahmesituation hinsichtlich der Reaktionszeiten und der Fahrqualität nach dieser Übernahme.

H2: Fahrer die vor der Übernahmeaufforderung eine Nebenaufgabe bearbeiten zeigen eine schlechtere Leistung in der Übernahmesituation als Fahrer die die Automation überwachen.

H3: Fahrer die mit einer Automation fahren zeigen eine schlechtere Leistung in einer schwierigen Fahrsituation als Fahrer die das Fahrzeug manuell steuern.

H4: Die Art der Situation in der die Übernahmeaufforderung ausgegeben wird führt zu unterschiedlichen Leistungen in der Übernahmesituation hinsichtlich der Reaktionszeiten und der Fahrqualität nach dieser Übernahme.

H5: Hinsichtlich der Leistungen in der Übernahmesituation gibt es einen Interaktionseffekt zwischen den verschiedenen Nebenaufgaben und Übernahmesituationen.

H6: Die Art der Nebenaufgabe und die Art der Übernahmesituation führen zu unterschiedlichen subjektiven Bewertungen der Situationen durch die Fahrer.

H7: Das Vertrauen in die Automation und der Komfort der Automation werden nach dem Erleben der Übernahmeszenarien anders eingeschätzt als vor den Szenarien.

Um diese Hypothesen zu untersuchen wurde ein Versuchsdesign erstellt das die unabhängigen Variablen *Art der Nebenaufgabe* sowie *Art der Situation* enthält. Die Nebenaufgaben wurde hierbei auf vier Gruppen aufgeteilt: Die Versuchsgruppe *Manuell* sollte alle Situationen ohne die Automation als manueller Fahrer erleben. Die Versuchsgruppe *Überwacht* sollte mit eingeschalteter Automation fahren, aber die Automation während der Fahrt überwachen. Die zwei weiteren Versuchsgruppen sollten mit eingeschalteter Automation fahren und dabei unterschiedlich motivierende Nebenaufgaben bearbeiten, die in Abschnitt 4.3.3 definiert werden.

Jeder Proband in den jeweiligen Versuchsgruppen sollte fünf Fahrszenarien erleben in denen Übernahmesituationen stattfinden. Die Szenarien sollten sich in ihrem Grad der Komplexität unterscheiden, jedoch im Sinne der Auswertung in ihrem Ablauf möglichst vergleichbar bleiben. Entsprechend der Gruppen und der Szenarien wurde ein gemischtes

4x5 Versuchsdesign entwickelt, das in Tabelle 6 noch einmal zusammenfassend dargestellt ist.

Tabelle 6: Versuchsdesign mit den Faktoren *Art der Nebenaufgabe* und *Art der Übernahme*situation.

	Faktor B: Art der Übernahme situation (innerhalb der Personen)				
Faktor A: Art der Nebenaufgabe (zwischen den Gruppen)	Szenario M01	Szenario M02	Szenario M03	Szenario M04	Szenario M05
Manuelle Fahrt	✓	✓	✓	✓	✓
Automatisierte Fahrt ohne Nebenaufgabe	✓	✓	✓	✓	✓
Automatisierte Fahrt mit Nebenaufgabe 1	✓	✓	✓	✓	✓
Automatisierte Fahrt mit Nebenaufgabe 2	✓	✓	✓	✓	✓

4.3. Methodik

In den folgenden Abschnitten wird die Methodik der durchgeführten Studie vorgestellt. Die Entwicklung der Übernahme

szenarien und die Umsetzung der Szenarien in einem Fahrsimulator sowie die Auswahl einer ablenkenden Nebenaufgabe werden beschrieben. Anschließend werden objektive und subjektive Maße definiert, anhand derer die Dauer und die Qualität der Übernahme bewertet werden können. Der Versuchsablauf und die Instruktion der Probanden werden zusammenfassend vorgestellt.

4.3.1. Use Case-Analyse und Gestaltung realistischer Fahr-Szenarien

Um technisch sinnvolle Szenarien für eine Übernahme gestalten zu können wurde auf Grundlage aktueller Publikationen zu Fähigkeiten und Grenzen automatisierter Fahrsysteme (Maurer, Gerdes, Lenz und Winner, 2015; Meyer und Beiker, 2014; Ziegler et al., 2014; Aeberhardt et al. 2012; Hillel, Lerner, Levi & Raz, 2014) zunächst ein Interview-Leitfaden entwickelt, mit dem Einschätzungen und Meinungen von Experten im Bereich des automatisierten Fahrens erhoben werden sollten. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Frage, in welchen Situationen ein automatisiertes Fahrzeug die Steuerung des Fahrzeugs übernehmen könnte und in welchen Situationen eine Übergabe an den Fahrer eingeleitet werden würde.

Die Frage nach Situationen die durch das Fahrzeug bewältigt werden könnten wurde weiter in Fragen bezogen auf die Fahrumgebung, die typischen Geschwindigkeiten und die Dauer der automatisierten Fahrt aufgeteilt. Um eine Einschätzung über die Situationen zu bekommen in denen das Fahrzeug eine Rückgabe der manuellen Steuerung an den Fahrer einleiten würde, wurde nach typischen Systemgrenzen automatisierter Systeme gefragt.

Systemgrenzen wurden weiter ausdifferenziert in Systemgrenzen in Zusammenhang mit der Umwelt (Schnee, Regen, Sonneneinstrahlung,...), Systemgrenzen in Zusammenhang mit der Technik (Sensorausfälle, Softwarefehler,...), Systemgrenzen in Zusammenhang mit umgebendem Verkehr (Verkehrsdichte, Unfälle,...), Systemgrenzen in Zusammenhang mit straßenbaulichen Gegebenheiten (Fahrbahnmarkierungen, Baustellen,...) und Systemgrenzen im Zusammenhang mit langfristig geplanten Übergaben an den Fahrer (Autobahnabfahrten, Müdigkeit,...). Zusätzlich wurden Fragen zu der Gestaltung der Warnungen im Falle einer Übernahme sowie Fragen zu möglichen Nebentätigkeiten während einer automatisierten Fahrt gestellt. Eine detaillierte Darstellung des Interviewleitfadens und eine Zusammenfassung der Antworten auf die Fragen findet sich in Anhang 7.1.

Die Experten-Interviews wurden durchgeführt mit N = 6 Mitarbeitern von in Deutschland in der Forschung aktiven OEMs und Automobil-Zulieferern. Alle Interviewpartner waren in der Forschung im Bereich automatisiertes Fahren aktiv und deckten dieses Themenspektrum mit den Blickwinkeln Technik, Human Factors/Mensch-Maschine-Interaktion, sowie Management/Planung ab. Aus den Antworten der Interviews wurde ein typisches automatisiertes Fahrzeug mit bestimmten Fähigkeiten und Limitationen abgeleitet. Ein automatisiertes Fahrzeug der näheren Zukunft wird demnach in Deutschland...

- auf einer Autobahn fahren.
- in gemischtem Verkehr zusammen mit automatisierten/nicht-automatisierten Fahrzeugen fahren.
- nur begrenzt mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur vernetzt sein (GPS, Mobile Data, Car-to-X).
- mit einer Geschwindigkeit von max. 100-130 km/h fahren (umfasst auch Stau-Assistenten mit niedrigeren Geschwindigkeiten).
- unabhängig von der Verkehrsdichte fahren.
- alle Straßenschilder erkennen.
- alle anderen Verkehrsteilnehmer erkennen die auf der Autobahn auftreten können.
- die Fahrspur halten und teilweise auch Überholvorgänge durchführen können.
- bei guten bis mittleren Wetter- und Straßenbedingungen funktionieren.
- teilweise die Nutzung von externen Geräten und internen HMIs während der Fahrt erlauben.
- zeitlich unbegrenzt automatisiert Fahren (keine Rückgabe der Steuerung nach einem festen Zeitintervall).
- zuverlässig alle Systemgrenzen erkennen.
- die Rückgabe der Steuerung an den Fahrer mit einem Zeitpuffer initiieren.
- den Fahrer multimodal über eine bevorstehende Übergabe informieren.
- jederzeit einen risikominimalen Zustand (z.B. Nothalt) herbeiführen können.

Auf Grundlage der Antworten in den Interviews und der Literatur wurden fünf Übernahmeszenarien konstruiert, die die aktuellen Systemgrenzen eines automatisierten Fahrzeugs möglichst gut widerspiegeln und gleichzeitig unterschiedliche Grade an Komplexität aufweisen. Da die in näherer Zukunft in Deutschland verfügbaren Systeme zunächst vorwiegend auf Autobahnen eingesetzt werden sollen, wurde für alle Szenarien eine mehrspurige Autobahn als Grundlage für die Simulation verwendet. Die für den Fahrsimulator umgesetzten Szenarien sind in Tabelle 8 zusammenfassend dargestellt. In den Szenarien *M01*, *M02*, *M03* und *M05* wurde die Übernahme der Steuerung auf einer

Autobahn mit drei Fahrspuren pro Fahrtrichtung simuliert. In Szenario *M04* waren nur zwei Fahrspuren vorhanden.

Die Gründe für die Übergabe der Steuerung an den Fahrer durch die Automation waren in den Szenarien jeweils: Eine Navigationsanweisung die nur durch den Fahrer durchgeführt werden kann (M01); Fehlende Fahrbahnmarkierungen (M02); Ein Sensorausfall (M03); Eine Baustelle (M04); Schlechte Wetterbedingungen/starker Regen (M05). Diese Übergabegründe passen gut zu dem Bericht des Automobilzulieferers Delphi Automotive Systems zu Gründen für das Abschalten der Automation bei Testfahrzeugen des Herstellers in den USA, die auf der Webseite des California Department of Motor Vehicles (DMV, 2016) veröffentlicht wurden. Hier ergab eine Auszählung der häufigsten Gründe für eine Übernahme der manuellen Steuerung im Bereich Highway/Interstate die folgende Rangfolge:

1. Schlecht sichtbare oder fehlende Fahrbahnmarkierungen
2. Spurwechseln bei sehr hohem Verkehrsaufkommen
3. Unerwartetes Verhalten von anderen Fahrern
4. Baustellen
5. Sensor- oder Softwareausfälle
6. Einsätze eines Polizei- oder Krankenwagens

Auch wenn diese Auszählung nur bedingt repräsentativ für mögliche Übernahmeszenarien auf deutschen Autobahnen ist, so lässt sich hier dennoch ein erster Hinweis auf die aktuellen Grenzen solcher Systeme in einem Feldversuch ableiten. Zu beachten ist allerdings, dass aus dem Bericht nicht eindeutig zu erkennen ist in welchen Fällen das System eine Übernahme veranlasst hat und in welchen Fällen der Testfahrer das System abgeschaltet hat.

Um sowohl die direkten Reaktionen der Testfahrer auf den TOR sowie die Reaktionsfähigkeit nach dem TOR abzubilden wurde nach jedem TOR zusätzlich ein Event ausgelöst auf das die Testfahrer reagieren mussten. Der zeitliche und räumliche Abstand zwischen dem TOR und dem Event wurde im Vorfeld auf Grundlage der Literaturanalyse in Kapitel 3.3 so definiert, dass die Automation nach einem TOR von den meisten Testfahrern bereits deaktiviert wäre. Da die berichteten Mittelwerte hier selbst bei stark ablenkenden und kognitiv beanspruchenden Nebenaufgaben 5 Sekunden nicht überschritten (Damböck, 2013; Gold et al., 2013; Louw et al., 2015), wurde diese Zeit als erster Hinweis auf einen sinnvollen Abstand zwischen dem TOR und dem Event gewählt. Zusätzliche Hinweise für die Definition gab die Literatur zu maximalen Entfernungen, in der Fahrzeug-Sensorik Objekte identifizieren kann. Laut Ziegler et al. (2014) erreichen aktuelle Radarsysteme im Fahrzeug maximale Reichweiten von 200 Metern bei guten Umweltbedingungen. Entsprechend wurde die Entfernung zwischen dem TOR und dem Event als ein Kompromiss dieser beiden Werte auf 175 Meter festgelegt, was bei einer angenommenen konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h nach dem TOR einem zeitlichen Abstand von ca. 5.25 Sekunden entsprach.

Allgemein wurde für die Entwicklung der Szenarien davon ausgegangen, dass die Rückgabe der Steuerung an den Fahrer nur in solchen Situationen akzeptabel sein kann, die für die Automation so eindeutig vorhersehbar sind, dass eine Übernahmeaufforderung mit einem Zeitpuffer ausgegeben werden kann. Weitere Vorüberlegungen zu den Fähigkeiten der simulierten Automation werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.3.2. Fähigkeiten und Grenzen der simulierten Automation

Die genaue Definition und Gestaltung der Fähigkeiten und Grenzen einer Automation sind entscheidend für die Ableitung von Erkenntnissen über das Verhalten von Menschen in Zusammenarbeit mit der Automation. Nur die Kombination aus dem Wissen über die tatsächliche Definition der Automation sowie das Wissen über die von den Testfahrern vermuteten Fähigkeiten der Automation ermöglichen begründete Interpretationen des Verhaltens der Probanden in den Übernahmeszenarien. Die von den Testfahrern vermuteten Fähigkeiten einer Automation werden zu einem Großteil durch die Instruktion geprägt. Die Instruktion der Probanden wird in Abschnitt 4.3.4 detailliert beschrieben.

Für die vorliegende Studie wurde von einer *perfekten* Automation (im Gegensatz zu einer *imperfekten* Automation z.B. in Skitka, Mosier & Burdick, 2000) ausgegangen. Hiermit ist eine Automation gemeint die weder falschen Alarme ausgibt noch kritische Situationen als unkritisch einstuft und entsprechend falsch auf das Ausgeben einer Warnung verzichtet. Dieser Bereich der Automationsforschung wurde für diese Studie bewusst ausgeklammert, da der Einfluss der Reliabilität der Automation auf das Verhalten der Nutzer nicht untersucht werden sollte. Es wurde also eine Automation implementiert die in 100% der Situationen eine Übernahmeaufforderung korrekt ausgab und alle Systemgrenzen richtig erkannte.

Weiterhin wurde festgelegt, dass die Automation in der Lage sein sollte das volle Spektrum der Fahrzeugdynamik in der Längsführung auszunutzen. Die Automation konnte also sowohl 100% der möglichen Beschleunigung als auch 100% der möglichen Verzögerung des Fahrzeugs nutzen um Situationen zu bewältigen. Nicht implementiert wurde hingegen eine Funktion, die Situationen über einen Spurwechsel oder ein Ausweichmanöver hätte entschärfen können.

Entsprechend der durchgeführten Experten-Interviews und passend zu den aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzungen auf verschiedenen europäischen Autobahnen wurde die von der Automation gefahrene Geschwindigkeit auf 120 km/h festgesetzt. Die Automation hielt während der automatisierten Fahrt vor dem TOR einen Abstand von 60 Metern zu eventuell vorausfahrenden Fahrzeugen ein. Vergleichbar zu dem von Strand et al. (2014) definierten Point-of-No-Return wurde zusätzlich ein minimaler Abstand zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem Ego-Fahrzeug definiert, der von der Automation eingehalten wurde solange diese eingeschaltet blieb. Während in Strand et al. (2014) ein Abstand definiert wurde ab dem das vorausfahrende Fahrzeug stark beschleunigte um eine Kollision zu vermeiden, bremste die hier implementierte Automation kurz vor dem Erreichen des minimalen Abstands stark ab und vermied so eine Kollision. Hierdurch wurde die Minimalbedingung für einen risikominimalen Zustand erfüllt, den ein vollautomatisiertes Fahrzeug nach der Klassifizierung der BAST (Gasser et al., 2012) jederzeit erreichen können muss.

Nach den vorhandenen Klassifizierungen für automatisierte Fahrsysteme lässt sich das definierte System demnach am ehesten zwischen die Stufen *Hochautomatisiert* und *Vollautomatisiert* nach Gasser et al. (2012) sowie weitestgehend in die Stufe 4 *High Automation* der SAE (2013) und die Stufen 3 und 4 *Limited Self-Driving Automation* und *Full Self Driving Automation* der NHTSA (2013) einordnen. Hierbei ist zu beachten, dass die Stufen dieser unterschiedlichen Definitionen nicht vollständig austauschbar sind und jeweils nur die sich am ehesten mit der Definition der BAST deckenden Stufen genannt wurden.

Die Automation meldete die Bereitschaft zur Übernahme der Steuerung über ein einfaches Symbol bestehend aus grün eingefärbten Händen und einem Lenkrad. War die Automation aktiv wurde ein in grün und blau gehaltenes Symbol eines Fahrzeugs mit einem umgebenden Kreis angezeigt. Der TOR wurde über rot eingefärbte Hände sowie ein rotes Lenkrad symbolisiert und von einem Warnton begleitet, wodurch die Anforderung eine multimodale Warnung zu verwenden erfüllt wurde. Die Symbole wurden im Fahrsimulator im Head-Up Display eingeblendet. Die verwendeten Piktogramme sind mit kurzen Erläuterungen in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Piktogramme zu dem Zustand der Automation.

		
<p>Das Assistenzsystem ist bereit zur Übernahme der Steuerung (Lenkung, Gas, Bremsen).</p>	<p>Das Assistenzsystem ist aktiv und übernimmt die Überwachung der Umgebung sowie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>	<p>Das Assistenzsystem hat eine Situation erkannt, die ein Eingreifen des Fahrers erforderlich macht. Bitte übernehmen Sie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>

Tabelle 8: Darstellung der für den Fahrsimulator umgesetzten Übernahmeszenarien.

Szenario	Bild der Übernahmesituation	Beschreibung der Übernahmesituation
M01		<p>Übernahmesituation in der der Fahrer aufgefordert ist die Steuerung zu übernehmen um eine bestimmte Route zu wählen, bzw. um von der Autobahn abzufahren. Kein umgebender Verkehr. 5.25 Sekunden nach dem TOR wird ein Navigationspfeil im Head-Up Display eingeblendet, der zum Spurwechsel auffordert.</p>
M02		<p>Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund von fehlenden Fahrbahnmarkierungen nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Ein Führungsfahrzeug fährt mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Ego-Fahrzeug in der Spur des Ego-Fahrzeugs. Auf der Überholspur wird eine moderate Verkehrsdichte simuliert. Zu dem Zeitpunkt des TORs hat das Führungsfahrzeug einen Abstand von ca. 250 Metern zum Ego-Fahrzeug und behält zunächst die Geschwindigkeit von 120 km/h bei. Nach 5.25 Sekunden bremst das Führungsfahrzeug stark, bis es eine Geschwindigkeit von 80 km/h erreicht hat, die es danach hält.</p>
M03		<p>Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund eines ausgefallenen Sensors oder eines Softwarefehlers nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Der Ablauf des Szenarios ist analog zu Szenario M02, mit dem einzigen Unterschied das keine fehlende Fahrbahnmarkierung simuliert wird.</p>
M04		<p>Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund einer Baustelle nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Auf der Überholspur wird hierbei zusätzlich eine hohe Verkehrsdichte simuliert. Ab dem Zeitpunkt des TORs verlangsamt die Automation das Ego-Fahrzeug entsprechend der durch Verkehrsschilder dargestellten Geschwindigkeitsbegrenzungen von ursprüngliche 120 km/h auf 60 km/h. Zusätzlich zu der Baustelle in einer Entfernung von 300 Metern vom TOR, wird ein liegen gebliebenes Fahrzeug simuliert, das zum Teil auf der Fahrspur des Ego-Fahrzeugs steht. Die Entfernung von dem Ego-Fahrzeug zu dem liegen gebliebenen Fahrzeug liegt zu dem Zeitpunkt des TOR bei 175 Metern.</p>
M05		<p>Übernahmesituation in der das Fahrzeug aufgrund der extremen Wetterbedingungen nicht mehr in der Lage ist mit ausreichender Sicherheit zu lenken und daher an den Fahrer übergibt. Der Ablauf des Szenarios ist analog zu den Szenarien M02 und M03. Zusätzlich wird zu dem Zeitpunkt des TORs das plötzliche Einsetzen eines Starkregens simuliert, der für die Dauer des Szenarios anhält.</p>

4.3.3. Auswahl einer fahrfremden Tätigkeit für die Fahrer „out-of-the-loop“

In der vorangegangenen Zusammenfassung der bisherigen Literatur zu Übernahme-situationen im Fahrzeug wurde für die Ermittlung einer realistischen Übernahmezeit die Anforderung aufgestellt, dass der Fahrer die Übernahme durchführt nachdem er so vollständig und realistisch wie möglich *out-of-the-loop* war – sich also während der automatisierten Fahrt mit einer vollkommen anderen Aufgabe als der Fahraufgabe beschäftigt hat und sein Situationsbewusstsein im Moment der Übernahmeaufforderung stark eingeschränkt ist. Um den Fahrer entsprechend dieser Anforderungen visuell, kognitiv und motorisch zu beanspruchen und von der Fahraufgabe abzulenken wurden zwei Nebenaufgaben entwickelt, die im Kontext von automatisiertem Fahren realistisch erscheinen.

Eine Vielzahl von Nebenaufgaben ist bereits für eben diese Art der Ablenkung während einer automatisierten Fahrt verwendet worden. Die häufigste Art der Präsentation der Nebenaufgabe scheint bislang auf einem Tablet-Computer, bzw. auf einem Smartphone oder Laptop-Bildschirm zu sein (Damböck et al., 2012; Damböck, 2013; Gold et al., 2013a; Gold et al., 2013b; Dogan et al., 2014; Petermann-Stock et al., 2015; Louw et al., 2015). Eine weitere Art der Präsentation ist das fahrzeuginterne HMI (Tofetti et al., 2009; Gold et al., 2013a; Wulf et al., 2013; Lorenz et al., 2014; Zeeb et al., 2015). Außerdem wurden bereits rein sprachliche Aufgaben getestet (Merat et al., 2013; Radlmayer et al., 2014; Gold et al., 2015) und in einigen Studien auch analoge Medien wie z.B. Zeitschriften verwendet (Helldin et al., 2013; Dogan et al., 2014; Naujoks et al., 2014).

Petermann-Stock et al. (2013) führten vor der Durchführung ihrer Studie zu Übernahmezeiten im Fahrzeug eine Expertenbefragung zu dem Thema Nebenaufgaben in automatisierten Fahrzeugen durch. Als besonders wahrscheinlich in einem automatisierten Fahrzeug und gleichzeitig als besonders visuell, motorisch und kognitiv beanspruchend wurden in der Studie die Tätigkeiten „Erledigung von Office Arbeiten auf Notebook/Tablet-PC“, „Surfen im Internet auf mobilem Endgerät“ und „Games auf einem mobilen Endgerät spielen“ identifiziert. Diese Tätigkeiten wurden von den Experten in Petermann-Stock et al. (2013) außerdem als Nebenaufgaben bewertet, die einen besonders hohen internen Anreiz haben und einer geringen externen Kontrolle unterliegen. Diese Art von Nebenaufgaben ist also für einen Fahrer besonders schwierig zu unterbrechen und kann auch schwer durch das Fahrzeug unterbrochen werden.

Die von Petermann-Stock et al. (2013) identifizierte Komponente der intrinsischen Motivation des Fahrers zum Fortführen einer Nebenaufgabe wurde bisher noch nicht als Einflussfaktor auf die Dauer der Übernahme-situation untersucht. Daher wurden auf Grundlage der Literatur und der Experten-Interviews (siehe Anhang 7.1) zwei zu untersuchende Nebenaufgaben definiert: Die Aufgabe *Lesen* bestand aus dem Lesen von Zeitschriftenartikeln auf einem Tablet Computer. Die Aufgabe *Spiel* beinhaltete das Spielen eines Spiels über den Touchscreen eines Tablet-Computers. Beide Aufgaben wurden als visuell, motorisch und kognitiv beanspruchend eingestuft. Für die Aufgabe *Spiel* wurde zusätzlich vermutet, dass das Spiel für die Testfahrer besonders involvierend ist und somit das Loslösen von der Aufgabe erschwert wird.

Für die Auswahl eines geeigneten Spiels für diese Aufgabe wurden zunächst Anforderungen an das Spiel aufgestellt. Das Spiel sollte eine möglichst hohe Motivation und Immersion bieten, motorisch beanspruchend, möglichst schwer unterbrechbar und leicht zu erlernen sein. Für die Bewertung dieser Eigenschaften wurde in Anlehnung an Jennet et al. (2008) ein

kurzer Fragebogen entworfen, der diese Eigenschaften mithilfe einiger Fragen abdeckte. Der vollständige Fragebogen zur Bewertung der Spiele kann in Anhang 7.2 eingesehen werden. Zusätzlich zu den erwähnten Anforderungen musste gegeben sein, dass das Spiel möglichst ohne Unterbrechungen für mindestens die Dauer der automatisierten Fahrt gespielt werden konnte.

Die Spiele Tetris, Jetpack Joyride, Sonic und Flipper wurden aufgrund ihrer weiten Verbreitung und einer vermuteten schweren Unterbrechbarkeit für die Evaluation mithilfe des Fragebogens ausgewählt. Nach dem Spielen der einzelnen Spiele wurde der Fragebogen für jedes Spiel von $N = 10$ Probanden ausgefüllt. Auf Grundlage der Fragebogendaten wurde das Spiel Tetris als am besten als ablenkende Nebenaufgabe geeignet bewertet. Das Spiel erreichte hohe Werte sowohl bei der Motivation als auch bei der motorischen Beanspruchung und war am leichtesten zu erlernen. Das Grundprinzip des Spiels ist es, vom oberen Bildschirmrand herabfallende Spielsteine mit unterschiedlichen geometrischen Formen durch Verschieben und Drehen auf eine möglichst platzsparende Weise zu stapeln und so lückenlose Reihen am unteren Rand des Bildschirms zu bilden. Das Drehen und Verschieben der Spielsteine erfolgte in dieser Version des Spiels über das Tippen und Wischen auf dem Touchscreen des Tablet-PCs. Vollständige Reihen werden aufgelöst und mit Punkten belohnt. Unvollständige Reihen bleiben erhalten. Auf jeden gestapelten Spielstein folgt unmittelbar der nächste Spielstein, wodurch sich das Spielfeld zunehmend füllt und die Schwierigkeit im Verlauf des Spiels ansteigt. Abbildung 15 zeigt einen Screenshot eines typischen Spielfelds im Verlauf des Spiels.

4.3.4. Versuchsablauf und Instruktion der Probanden

Nach der Begrüßung wurden die Probanden über den geplanten Versuch und den Umgang mit dem Fahrsimulator informiert und ihr Einverständnis zur Aufzeichnung und Auswertung der Daten eingeholt. Im Anschluss wurden die Probanden über die Ziele der Studie informiert und hinsichtlich ihres Verhaltens instruiert. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf dem Einhalten der Straßenverkehrsordnung, dem Beachten der Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke und dem Absichern der Umgebung. Den Probanden wurde in den Instruktionen außerdem die Funktionsweise des automatisierten Assistenzsystems beschrieben. Es wurde deutlich gemacht, dass das System die Steuerung über das Fahrzeug vollständig übernehmen kann, es aber Fahrsituationen gibt die vom Fahrzeug nicht alleine bewältigen werden können. Entsprechend der Definition der Fähigkeiten der Automation aus Abschnitt 4.3.2 wurde kommuniziert, dass solche Situationen von dem Fahrzeug zu 100% richtig erkannt werden und dass das Fahrzeug die Fahrer entsprechend mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert. Die Fahrer wurden auch darüber informiert, dass das System immer so lange aktiv bleibt bis der Fahrer das System aktiv abschaltet.



Abbildung 15: Screenshot eines typischen Spielverlaufs in der als Nebenaufgabe ausgewählten Version des Spiels Tetris.

Zusätzlich wurden die Bedienung des Systems (Ein- und Ausschalten) sowie die möglichen Statusanzeigen des Systems erläutert. Zum Einschalten der Automation wurde ein Hebel hinter dem Lenkrad verwendet, dessen Bedienung analog zu aktuellen Tempomat- und ACC-Systemen funktionierte. Es wurde erklärt, dass die automatische Steuerung des

Fahrzeugs beendet wird sobald die Fahrer entweder diesen Hebel hinter dem Lenkrad erneut betätigen oder sie das Bremspedal treten. Alle diese Informationen wurden als Vorbereitung auf eine erste Trainingsfahrt mit der Automation gegeben. Die vollständigen Instruktionen die als Vorbereitung auf die Trainingsfahrt gegeben wurden können in Anhang 7.3 nachgelesen werden.

Vor Beginn der Trainingsfahrt wurde den Probanden die Steuerung des Fahrsimulators und die Interaktion mit der Automation noch einmal direkt in der Sitzkiste erklärt. Nach der Einweisung in die Funktionen des Fahrsimulators absolvierten die Probanden eine Trainingsfahrt, die mit dem Fahren im Simulator vertraut machen sollte. Außerdem wurde in der Trainingsfahrt ein Teil der Strecke mit angeschalteter Automation zurückgelegt, sodass die Bedienung und die Fähigkeiten der Automation demonstriert werden konnten. Die Trainingsfahrt startete auf einem Autobahnrastplatz von dem die Probanden auf die Autobahn auffahren sollten. Die Probanden wurden instruiert mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h zu fahren. Es wurde eine mittlere Verkehrsdichte simuliert. Auf dem rechten Fahrstreifen bewegte sich der Verkehr mit ca. 100 km/h, auf dem linken Fahrstreifen mit ca. 160 km/h, sodass Fahrzeuge überholt und nachfolgender Verkehr beachtet werden musste um die vorgegebene Geschwindigkeit zu halten. Nach einem Abschnitt von ca. 10 Kilometern meldete die Automation die Bereitschaft zur Übernahme der Steuerung und die Probanden sollten die Funktion aktivieren. Sobald die Automation aktiviert war wurden die Probanden gebeten die Hände vom Lenkrad zu nehmen und die Füße bequem auf den Boden zu stellen. Die Automation fuhr nun mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h, bremste hinter verzögernden Fahrzeugen und führte unter Beachtung des nachfolgenden Verkehrs auch Spurwechsel durch wenn sich langsamere Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen befanden. Nach einem automatisierten Streckenabschnitt von ca. 10 Kilometern wurde eine Übernahmeaufforderung ausgegeben und die Probanden sollten die Steuerung des Fahrzeugs wieder übernehmen. Den Abschluss der Trainingsstrecke bildete ein weiterer Autobahnrastplatz auf den die Probanden abfahren und dann anhalten sollten.

Nach Abschluss der Trainingsfahrt wurden den Probanden Instruktionen entsprechend ihrer Versuchsgruppe gegeben und die jeweilige Nebenaufgabe wurde erklärt und eingeübt. Die Instruktionen definierten die drei automatisierten Versuchsgruppen: *Überwacht*, *Lesen* und *Spiel*. Die Gruppe *Überwacht* wurde instruiert die Aktionen der Automation während der Fahrt zu überwachen, die Gruppen *Lesen* und *Spiel* sollten die entsprechenden Nebenaufgaben aufnehmen sobald Sie die Automation eingeschaltet hatten. Alle automatisierten Gruppen sollten die Steuerung nur dann übernehmen, wenn von dem Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde. Die Gruppe *Manuell* hatte keine automatisierte Fahrfunktion zur Verfügung. Den Probanden in dieser Versuchsgruppe wurde ein fiktives Assistenzsystem erklärt, das schwierige Situationen erkennt und entsprechend vor diesen Situationen warnt. Diese Warnung entsprach in allen Situationen dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung in den automatisierten Gruppen. Die Instruktionen der verschiedenen Versuchsgruppen vor Beginn der Szenarien können vollständig in Anhang 7.4 eingesehen werden.

4.3.5. Definition der gemessenen objektiven Parameter

Die Definition der zu messenden Parameter ist unbedingt notwendig um die Ergebnisse vergleichbar zu machen und um zu verstehen wie die Ergebnisse entstanden sind. Als objektive Parameter werden in dieser Studie alle diejenigen Messwerte verstanden, die anhand von Zeiten, Fahrdaten, Simulatordaten, Blickdaten und Videodaten erhoben wurden. Besonders wichtig sind die Definitionen wenn Reaktionszeiten berichtet werden sollen, da

schon ein minimal abweichendes Verständnis von Messzeitpunkten für diese Reaktionen zu Abweichungen in der Interpretation der Ergebnisse führen können.

4.3.5.1. Messzeitpunkte und Reaktionszeiten

Für die Definition der Messzeitpunkte zur Erhebung von Reaktionszeiten wurde auf die vorhandene Literatur zurückgegriffen. Der Messzeitpunkt für den Start der Messung ist hierbei in fast allen Studien gleich und geht von dem Moment der Präsentation der Übernahmeaufforderung aus (vgl. Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013a; Petermann-Stock et al., 2013; Wulf et al., 2013; Dogan et al., 2014; Petermann-Stock et al., 2015; Zeeb et al., 2015; Louw et al., 2015; Gold et al., 2015). In Helldin et al. (2013) wurde der Start der Messung definiert als das Erreichen einer kritischen Systemgrenze (maximale Schneefall-Menge). Für das Ende der Messung und somit den für die Definition der Reaktionszeit entscheidenden Zeitpunkt, lassen sich eine Reihe von Kriterien identifizieren die als Hinweis auf eine Übernahme der Kontrolle bzw. als Hinweis auf eine Reaktionsbereitschaft gewertet werden. Petermann-Stock et al. (2015) definieren vier Klassen von Reaktionen während der Übernahme. Diese Klassen sollen hier verwendet werden um die in den bisherigen Studien operationalisierten Messzeitpunkte zu ordnen: *Orientierungsreaktion*, *Handlungsbereitschaft*, *Handlungsdurchführung* und *Fahrzeugstabilisierung*.

Die häufigsten Operationalisierungen für die *Orientierungsreaktion* sind das Aufblicken von der bearbeiteten Nebenaufgabe nach einer automatisierten Fahrt (z.B. Petermann-Stock et al., 2015) sowie die Blickzuwendung zur Straße (z.B. Damböck, 2013; Gold et al., 2013a). Für die vorliegende Studie wurde für die Definition der Reaktionszeit *Blick auf die Straße* der Zeitraum zwischen der Präsentation der Übernahmeaufforderung und dem ersten Blick auf die Straßenmitte definiert. Die Blickbewegungen in der Studie wurden mithilfe des Blickbewegungssystems „Dikablis“ (Lange, 2005) erhoben, das eine Trackingfrequenz von 50 Hz bereitstellt. Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Systems wird in Abschnitt 4.3.5.3 gegeben.

Für die Reaktion *Handlungsbereitschaft* wurden am häufigsten Reaktionen an den Stellteilen definiert, die entweder berührt oder umfasst werden mussten um als handlungsbereit klassifiziert zu werden (z.B. erster Kontakt mit dem Lenkrad (Petermann-Stock et al., 2015; Zeeb et al., 2015); Hände am Lenkrad (Damböck, 2013; Lorenz et al., 2014; Naujoks et al., 2014)). Entsprechend dieser Definitionen von Handlungsbereitschaft wurde für die vorliegende Studie davon ausgegangen das Fahrer motorisch die Möglichkeit hatten in die Situation einzugreifen bzw. die Steuerung zu übernehmen, sobald Sie mit mindestens einer Hand das Lenkrad umfassen. Als zusätzlicher Messwert für die Handlungsbereitschaft wurde für diese Studie der Zeitpunkt definiert an dem der Fuß des Fahrers das Gas- oder Bremspedal berührt. Sowohl die Hand- als auch die Fußbewegungen wurden mithilfe von Kameras (25 Bilder pro Sekunde) erhoben.

Größere Unterschiede als bei der Handlungsbereitschaft zeigten sich in den vorhandenen Studien bei der Definition des Messzeitpunktes für die *Handlungsdurchführung*. In Gold et al. (2013a) wurden als Handlungsparameter die Zeit bis zu einem ersten Eingreifen in die Steuerung (Veränderung des Lenkwinkels $>2^\circ$ oder Veränderung der Bremspedalstellung um 10%, siehe auch Lorenz et al., 2014; Radlmayer et al., 2014; Zeeb et al., 2015) sowie der Blick in den Seitenspiegel und das Aktivieren des Blinkers definiert. Ähnliche Werte als Kriterien für einen Eingriff in die Steuerung wurden auch in Petermann-Stock et al. (2013) und Petermann-Stock et al. (2015) vorgeschlagen (Lenkradwinkelgeschwindigkeit $>4^\circ/\text{Sekunde}$; erste Betätigung des Bremspedals; Vorzeichenwechsel bei Lenkradmoment

und Lenkradwinkel). Auch in Helldin et al. (2013), Dogan et al. (2014) und Naujoks et al. (2014) wurde ein Eingreifen in die Steuerung als Zeitpunkt für eine Handlungsdurchführung festgelegt. In Lorenz et al. (2014) wurde weiterhin die Art der Reaktion auf die Übernahmeaufforderung klassifiziert und die Anteile der Reaktionsarten in Bezug auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen verglichen um einen weiteren Hinweis auf die Stufe der *Handlungsdurchführung* nach einem TOR zu erhalten.

Für die nachfolgende Studie wurden entsprechend Kriterien für eine erste Handlungsdurchführung nach einem TOR festgelegt. Der Zeitpunkt des Abschaltens der Automation wurde definiert als Betätigung des Hebels, mit dem die Automation abgeschaltet wurde, oder als erste Reaktion am Bremspedal (Bremspedalstellung > 0). Weiterhin wurde eine Bremsreaktion definiert als Betätigen des Bremspedals von mehr als 10% um diese Reaktion von dem bloßen „Antippen“ des Bremspedals zum Abschalten der Automation nach einem TOR zu unterscheiden. Für die Blickreaktionen wurden in dieser Klasse der Reaktionen außerdem die Zeitpunkte festgelegt in denen die Fahrer das erste Mal auf den Seitenspiegel und auf den Tacho sahen. Diese Werte wurden analog zu dem Blick auf die Straße mithilfe des Blickbewegungssystems erhoben. Um wie Lorenz et al. (2014) Hinweise auf das Verhalten der Fahrer nach einem TOR zu erhalten wurden die Arten der Reaktionen auf den TOR klassifiziert als „keine Reaktion“, „Bremsen“, „Lenken und Bremsen“, „Ausschalten der Automation mit dem Hebel“ und „Nur Lenken“. Nach den gleichen Kategorien wurden auch die Reaktionen auf das Event klassifiziert.

Auch für die *Fahrzeugstabilisierung* wurde in bereits veröffentlichten Studien eine Reihe von verschiedenen Maßen verwendet, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden. Für die Beschreibung der Stabilisierung des Fahrzeugs nach einer Übernahmeaufforderung werden häufig verschiedenste Fahrdaten verwendet, die Hinweise auf das Verhalten der Fahrer während und nach einer Übernahme liefern können.

4.3.5.2. Fahrdaten

Grundsätzlich lassen sich die erhobenen Fahrdaten in bisherigen Studien aufteilen in durchschnittliche Werte, die über einen bestimmten Zeitraum nach der Übernahme erhoben wurden und absolute Werte, die als das Erreichen/Nicht-Erreichen eines bestimmten Kriteriums definiert wurden. Zu der ersten Kategorie gehören zum Beispiel die Studien von Brandenburg und Skottke (2014), Merat et al. (2014), Louw et al. (2015) und Gold et al. (2015). Verwendete Werte zur Analyse des Fahrverhaltens nach der Übernahme umfassen die mittleren Abstände, Time Headways und Time to Collisions zu vorausfahrenden Fahrzeugen, die Spurhaltegüte gemessen als Standardabweichung der Spurposition, die Anzahl der Lenkumkehrungen sowie die durchschnittlichen Längs- und Querbeschleunigungen nach dem TOR. In Damböck et al. (2012), Merat et al. (2012) sowie Strand et al. (2014) wurden hingegen für die jeweils verwendeten Szenarien Kriterien definiert die für ein erfolgreiches Abschließen der Situation erfüllt werden mussten, bzw. die als kritisch gewertet wurden. Hierzu gehören entsprechend der verwendeten Szenarien das Halten des Fahrzeugs in einer vorgegebenen Fahrspur, das Abschließen eines vorgegebenen Fahrstreifenwechsels und das Erreichen eines „Point of No Return“ ab dem eine Kollision nicht mehr vermieden werden konnte.

Für die vorliegende Studie wurden sowohl mittlere Werte als auch absolute Kriterien definiert anhand derer die Qualität der Übernahme nach einem TOR sowie nach dem Event in den jeweiligen Szenarien bewertet werden sollte. Bezogen auf durchschnittliche Werte über einen Zeitraum wurden die gewählten Geschwindigkeiten während und nach der

Übernahmesituation, die Intensität der Bremsreaktion, der Abstand zum Vorderfahrzeug sowie maximale Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung erhoben. Als absolute Kriterien für die Qualität einer Übernahme wurden Kollisionen mit umgebendem Verkehr analysiert und kritische Ereignisse definiert. Als kritische Ereignisse wurden starke Bremsungen als Kombination aus einem hohen maximalen Bremsdruck und einer hohen maximalen Verzögerung des Fahrzeugs, das Stoppen des Fahrzeugs innerhalb eines Szenarios (Geschwindigkeit < 10 km/h), sowie die Eingriffe der Automation in die Steuerung (Einleiten des risikominimalen Zustands) gezählt.

Die Fahrdaten wurden in der Fahrsimulation SILAB (Krueger, Grein, Kaussner und Mark, 2005) in der Version 4 erhoben. Der verwendete Fahr Simulator bestand aus einer Sitzkiste mit Fahrer- und Beifahrersitz, einem Lenkrad und Pedalerie. Die Simulation wurde von drei Beamern auf Leinwände projiziert. Über die Simulation wurden außerdem vier kleine Bildschirme angesteuert, die als Seitenspiegel, Rückspiegel und Geschwindigkeitsanzeige dienen. Fahrergeräusche, Motorgeräusche und Geräusche des umgebenden Verkehrs wurden über ein Surround-Sound System ausgegeben. Die Konfiguration des Simulator-Raums ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums (Foto: Matthias Powelleit).

4.3.5.3. Blickbewegungsdaten und Beobachtungskameras

Blickbewegungen wurden in einigen bisher veröffentlichten Studien verwendet um Hinweise auf eine erste Reaktion der Fahrer auf die Übernahmeaufforderung zu erhalten (z.B. Damböck, 2013; Lorenz et al., 2014). Zusätzlich wurde teilweise der Blick in den Seitenspiegel als ein weiteres Maß für das Verständnis der Situation und die Bereitschaft zum Handeln erhoben (Gold et al., 2013b; Lorenz et al., 2014).

Während der Versuche wurden die Blickbewegungen der Probanden durch das Blickbewegungssystem Dikablis (Lange, 2005) erhoben. Das System bestand aus zwei auf dem Kopf der Probanden befestigten Kameras die die Augenbewegungen sowie die Sicht des Probanden aufzeichneten. Die Trackingfrequenz der Augenkamera beträgt 50 Hz, die Szenenkamera zeichnet Videos mit einer Auflösung von 768 x 576 Pixeln auf. Das System wird ähnlich einer Brille getragen und mittels eines Bands am Kopf der Probanden fixiert. Die Augenkamera kann entsprechend der Anatomie der Probanden in ihrem Winkel angepasst werden und leuchtet das Auge mithilfe einer Infrarotlampe aus, wodurch auch die Verwendung mit Brillen möglich ist und eine Verdeckung der betrachteten Szenerie minimiert werden kann. Auch der Winkel der Szenenkamera kann der Größe und Sitzposition des Probanden entsprechend ausgerichtet werden um eine möglichst gute Abdeckung des Sichtfeldes der Probanden zu gewährleisten. Die Verwendung des Blickbewegungssystem Dikablis bei Probanden mit und ohne Brille ist in Abbildung 17 dargestellt.

Zusätzlich zu den Kameras an dem Blickbewegungssystem wurden Daten von zwei weiteren Beobachtungskameras aufgezeichnet, die auf den Fahrer und auf den Fußraum des Fahrers ausgerichtet waren. Eine zusätzliche Kamera zeichnete die Fahrszene und den Fahrer von hinten auf, um einen Überblick über das Geschehen im Simulator-Raum zu erhalten.



Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung des verwendeten Blickbewegungssystem Dikablis bei Probanden mit und ohne Brille. Quelle: Dikablis User Manual (Ergoneers, 2011; S. 20).

4.3.6. Definition der subjektiven Messwerte aus Fragebogendaten

Als subjektive Messwerte werden in dieser Studie alle Daten verstanden die als Ergebnis von subjektiven Einschätzungen der Probanden bezüglich ihrer Einstellungen, Erlebnisse und Einschätzungen von Situationen vor während und nach den simulierten Übernahmeszenarien entstanden sind. Diese Fragebogendaten wurden verwendet um neben den Verhaltensdaten eine subjektive Bewertung der Situationen zu erhalten und entsprechend der Forschungsfragen Unterschiede zwischen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien zu analysieren. In der vorliegenden Studie wurde ein Fokus auf die Aspekte Vertrauen in Automation und Komfort bei der Verwendung von automatisierten Fahrfunktionen gelegt. Hierbei sollte erhoben werden, ob sich die Bewertung des Vertrauens und des Komforts nach dem Erleben der Übernahmeszenarios im Vergleich zu vorher verändert. Zusätzlich sollte für die einzelnen Übernahmeszenarios vergleichend die Kontrollierbarkeit und Beanspruchung während der Szenarien erfasst werden.

4.3.6.1. Vertrauen

Vertrauen des Nutzers in die Fähigkeiten eines technischen Systems oder einer Automation wird häufig als wichtige Komponente für den Umgang mit dem System identifiziert. Lee und See (2004) beschreiben die Kalibrierung des Vertrauens in die Fähigkeiten einer Automation entsprechend der tatsächlichen Fähigkeiten dieser Automation als essentiell um Konflikte bei der Interaktion zwischen Mensch und Automation zu vermeiden.

Auch im Bereich der Fahrzeug-Automation wird Vertrauen allgemein als beeinflussender Faktor auf die Verwendung von Fahrerassistenzsystemen und im speziellen als Einflussfaktor auf die Überwachung von automatisierten Fahrfunktionen beschrieben. Helldin et al. (2013) versuchen in ihrer Studie die von Lee und See (2004) beschriebene Kalibrierung des Vertrauens in die Fähigkeiten eines simulierten automatisierten Fahrzeugs, um eine Verbesserung der Übernahme der manuellen Steuerung zu einem angemessenen Zeitpunkt zu erreichen. Shen und Neyens (2014) messen und diskutieren das Vertrauen als einen Hinweis auf die Dauer der Übernahme nach einem TOR während einer automatisierten Fahrt.

In der vorliegenden Studie sollte das Vertrauen in die Automation vor und nach dem Erleben von fünf Übernahmeszenarien gemessen werden. Um Vertrauen anhand von etablierten Konstrukten zu operationalisieren wurde auf die Skalen zu Vertrauen in automatisierte Systeme von Jian, Bisantz und Drury (2000) zurückgegriffen. Die Autoren decken mit den in ihrem Fragebogen enthaltenen Items die Konstrukte Vertrauen, Reliabilität und Bekanntheit ab. Die Aussagen aus dem Fragebogen der Autoren wurden für diese Studie ins Deutsche übersetzt und für die Untersuchung von Vertrauen in automatisierte Fahrerassistenzsysteme modifiziert. Erstellte Fragebogenitems beinhalteten unter anderem die Aussagen „Ich kann dem System vertrauen“ (Vertrauen), „Das System ist verlässlich“ (Reliabilität) und „Ich weiß wie das System funktioniert“ (Bekanntheit). Der vollständige verwendete Fragebogen zur Erhebung des Vertrauens in die Automation kann in Anhang 7.5 eingesehen werden.

4.3.6.2. Komfort

Neben der Sicherheit ist der Komfort eines der Hauptargumente der Fahrzeughersteller für die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen (Trimble et al., 2014). In automatisierten oder teilautomatisierten Fahrzeugen wird der Komfort nicht zuletzt beeinflusst durch das Verhalten der Automation in der Interaktion mit anderen Fahrzeugen sowie durch die Wahl der Geschwindigkeit und der Abstände in verschiedenen Situationen (Siebert et al., 2012). Entsprechend wird auch im Bereich der Ermittlung von Übernahmezeiten von einer hochautomatisierten Fahrt häufig nicht nur die Definition einer sicheren, sondern einer für den Fahrer komfortablen Zeit angestrebt und entsprechend in die Bewertung der Übernahmeszenarien einbezogen (z.B. Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013a).

Um das erwartete Komforterleben während einer Fahrt mit der Automation mit dem Komforterleben nach dem Durchfahren von fünf kritischen Übernahmeszenarien zu erfassen wurde der von Siebert et al. (2012) entwickelter Fragebogen *Discomfort in Automated Driving* angepasst und leicht gekürzt. Der Fragebogen umfasste Fragen aus den Bereichen Belastung/Beanspruchung während der Fahrt mit der Automation, wahrgenommene Gefahr, bzw. Risikoerleben während der Fahrt sowie die erlebte Kontrolle über die Automation. Beispielitems für diese Kategorien waren respektive „Das System ist für mich eine zusätzliche Belastung“, „Ich habe mich während der Fahrt sicher gefühlt“ und „Ich hatte immer die Kontrolle über das System“. Der vollständige in der vorliegenden Studie verwendete Fragebogen ist in Anhang 1.1 beigefügt.

4.3.6.3. Kontrollierbarkeit und Beanspruchung

Jeweils nach Abschluss jedes Übernahmeszenarios wurden durch einzelne Fragebogen-Items die Kontrollierbarkeit und Beanspruchung der soeben erlebten Situation, das subjektive Risiko während der Situation sowie der Komfort und die zeitliche Beanspruchung bei der Übernahme der Steuerung des Fahrzeugs erhoben. Für die Gestaltung der Fragen wurde teilweise auf Neukum und Krüger (2003; Kontrollierbarkeit) und Items aus dem NASA Task-Load-Index (Hart und Staveland, 1988; Beanspruchung/zeitliche Beanspruchung) zurückgegriffen und teilweise eigene Items generiert (Komfort; Risiko). Der vollständige in der vorliegenden Studie verwendete Fragebogen ist in Anhang 1.1 beigefügt.

4.4. Beschreibung der Stichprobe

Die Fahrsimulator-Studie wurde mit $N = 60$ Versuchspersonen im Alter von 20 bis 76 ($M = 36.03$, $SD = 15.21$) Jahren durchgeführt. 22 Personen der Stichprobe waren weiblich, 38 Personen männlich. Die Teilnehmer der Studie waren im Durchschnitt seit 17.83 ($SD = 14.91$) Jahren in Besitz eines Führerscheins.

Die Hälfte der Teilnehmer gab eine Fahrleistung von weniger als 9000 Kilometer im Jahr an, die andere Hälfte der Teilnehmer gab eine höhere jährliche Fahrleistung an. Erfahrungen im Umgang mit Assistenzsystemen der Längsführung (Tempomat, ACC, Notbremsassistent) gaben $n = 26$ Teilnehmer an, $n = 17$ Personen hatten außerdem bereits Erfahrungen im Umgang mit Assistenten der Querführung gesammelt (Spurhalteassistent, Spurverlassenswarner, Spurwechselassistent, Totwinkelassistent). $N = 38$ Personen aus der Stichprobe hatten bereits einmal ($n = 5$ Personen) oder mehr als einmal ($n = 33$ Personen) eine Fahrt in einem Fahrsimulator absolviert.

Die Versuche wurden im August des Jahres 2015 in den Zeiten zwischen 08:30 Uhr und 20:00 Uhr durchgeführt. $N = 36$ Teilnehmer gaben an in der Nacht vor dem Versuch 7 – 8 Stunden geschlafen zu haben, $n = 23$ Teilnehmer hatten 5 – 6 Stunden geschlafen, eine Person gab an weniger als 4 Stunden geschlafen zu haben.

Ihren persönlichen Kenntnisstand zu automatisiertem Fahren schätzten die Probanden auf einer Skala von 1 (Sehr gering) bis 15 (Sehr hoch) im Mittel mit 7.27 ($SD = 3.20$) ein. Dies entsprach in etwa der Skalenbeschriftung „Mittel“ – „Gering“. Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Antworten auf die einzelnen Kategorien. Die Verteilung weist auf zwei Gruppen innerhalb der Stichprobe hin, die ihren Kenntnisstand entweder als „Mittel“ – „Hoch“, oder als „Gering“ – „Mittel“ einschätzten.

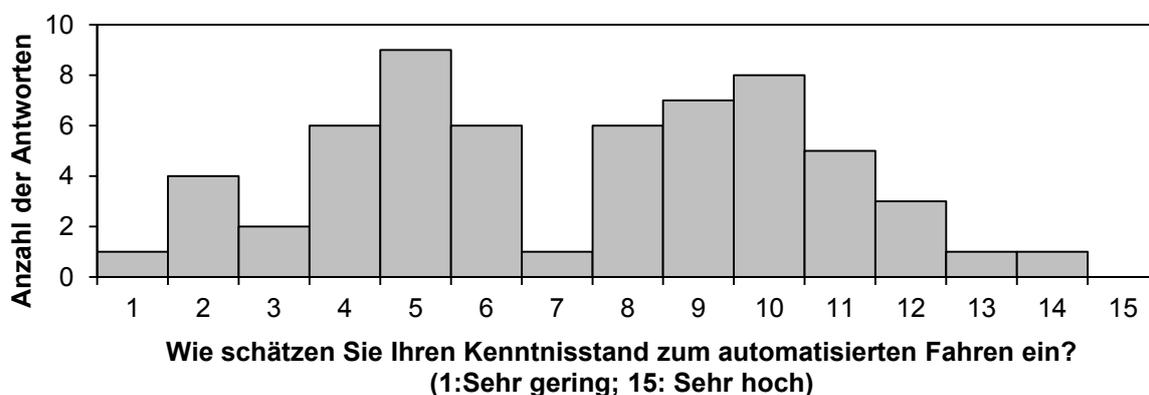


Abbildung 18: Verteilung der Urteile der Selbsteinschätzung der Versuchsteilnehmer über ihren Kenntnisstand zu automatisiertem Fahren.

4.5. Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt gegliedert nach Reaktionszeiten, Fahrdaten, Fragebogen-Ergebnissen und ersten Reaktionen auf den TOR und das Event. Alle statistischen Tests wurden mit einem Signifikanzniveau von 95% durchgeführt. Für paarweise Post-Hoc Vergleiche wurden Bonferroni-Korrekturen angewendet.

4.5.1. Fragebogendaten

Die Probanden erhielten nach jeder Übernahmesituation einen Fragebogen auf dem die erlebte Situation bewertet werden sollte. Es wurde jeweils gefragt nach der Kontrollierbarkeit, der Beanspruchung, dem wahrgenommenen Risiko, dem empfundenen Komfort sowie der zeitlichen Beanspruchung während der Situation.

Die Szenarien unterschieden sich in ihrer Kontrollierbarkeit ($F(4,180) = 29.68, p < .05$). Es bestand keine signifikante Interaktion mit dem Faktor Versuchsgruppe und die Gruppen unterschieden sich in Ihrer Bewertung der Kontrollierbarkeit nicht. Ein paarweiser Vergleich zwischen den Szenarien ergab nachweisbare Unterschiede zwischen den Bewertungen in dem Übernahmeszenario *M01* ($M = 1.40, SD = 1.86$) und den Szenarien *M02* ($M = 2.90, SD = 2.00$), *M03* ($M = 2.92, SD = 2.15$), *M04* ($M = 4.94, SD = 2.31$) und *M05* ($M = 3.45, SD = 1.93$). Auch das Szenario *M04* unterschied sich signifikant von allen anderen Übernahmeszenarien. Die Bewertungen entsprachen somit dem Bereiche „Harmlos“ für das Szenario *M01*, dem Bereich „Unangenehm“ für die Szenarien *M02*, *M03* und *M05*, sowie den

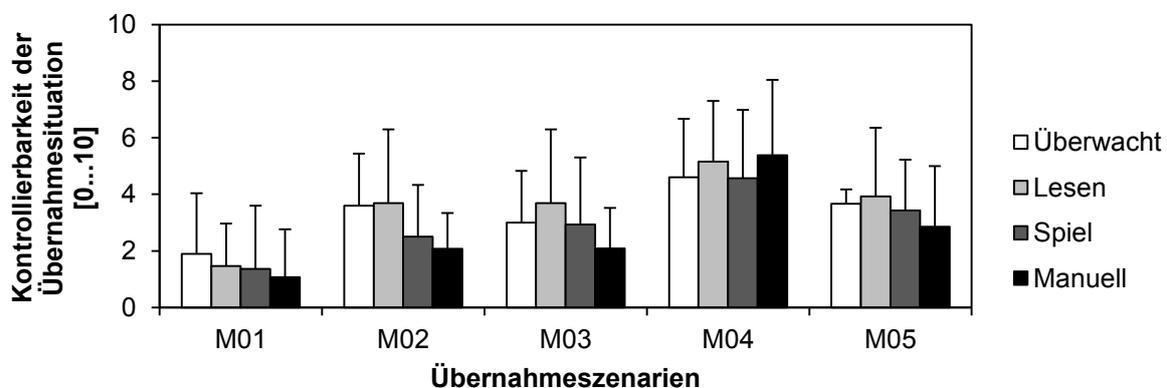


Abbildung 19: Mittlere subjektive Bewertung der Kontrollierbarkeit der Übernahmesituation mit Standardabweichungen in den verschiedenen Übernahmeszenarien und Versuchsgruppen.

Bereichen „Unangenehm“-„Gefährlich“ für das Szenario *M04*. Die Bewertungen der Kontrollierbarkeit der Übernahmeszenarien sind in Abbildung 19 noch einmal für die einzelnen Szenarien und Versuchsgruppen dargestellt.

Für die subjektive Beanspruchung während der Situation ergaben sich die gleichen Unterschiede zwischen den Szenarien wie für die Kontrollierbarkeit mit ($F(4,220) = 53.36, p < .05$). Als am höchsten beanspruchend wurde das Szenario *M04* bewertet ($M = 8.57, SD = 2.81$), gefolgt von Szenario *M05* ($M = 6.44, SD = 3.29$), *M03* ($M = 5.13, SD = 3.39$), *M02* ($M = 5.05, SD = 3.14$) und *M01* ($M = 2.49, SD = 2.43$). Für das Szenario *M04* lagen die Bewertungen also in einem Bereich von mittlerer bis hoher Beanspruchung, für die Szenarien *M02*, *M03* und *M05* in einem Bereich von geringer bis mittlerer Beanspruchung und für das Szenario *M01* in einem Bereich von sehr geringer bis geringer Beanspruchung.

Für die Bewertung des Risikos, des Komforts und der zeitlichen Beanspruchung ergaben sich jeweils die gleichen Muster wie für die Beanspruchung und die Kontrollierbarkeit. Es unterschieden sich jeweils die Szenarien signifikant in der subjektiven Wertung, für den Faktor Versuchsgruppe wurden keine Unterschiede festgestellt. Diese Maße sind daher im Folgenden nur noch einmal zusammenfassend als Grafik (Abbildung 20) dargestellt.

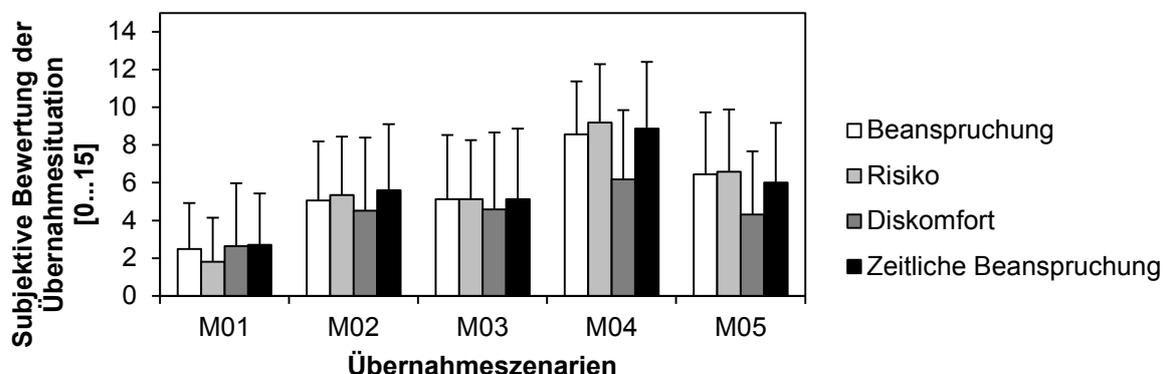


Abbildung 20: Mittlere Subjektive Bewertungen der Beanspruchung, des Risikos, des Diskomforts und der zeitlichen Beanspruchung in den Übernahmeszenarien mit Standardabweichungen. Höhere Werte indizieren höhere Beanspruchung, höheres Risiko, stärkeren Diskomfort und höhere zeitliche Beanspruchung.

Zusätzlich zu den Fragebogen nach jedem Übernahmeszenario wurden mithilfe von Fragebogen jeweils nach der Trainingsfahrt und nach Ende aller Übernahmeszenarien das subjektive Vertrauen in die Automation sowie der Diskomfort bei der Verwendung der Automation erfasst. Für das Vertrauen und den Diskomfort ergaben sich unabhängig von der Versuchsgruppe keine Unterschiede zwischen den Bewertungen vor dem Erleben der Übernahmeszenarien im Vergleich zu nach den Übernahmeszenarien. Der mittlere Wert des subjektiven Vertrauens in die Automation lag vor den Übernahmeszenarien bei $M = 5.04$ ($SD = 0.75$) und nach den Szenarien bei $M = 4.92$ ($SD = 0.80$) auf einer Skala von 1 (keine Zustimmung zu positiven Aussagen über das Vertrauen in die Automation) bis 7 (volle Zustimmung zu positiven Aussagen über das Vertrauen in die Automation).

Bezogen auf den erlebten Diskomfort während der automatisierten Fahrt konnten auch keine Unterschiede zwischen den Bewertungen vor und nach den Übernahmeszenarien festgestellt werden. Der mittlere Wert des subjektiven Diskomforts lag vor den Übernahmeszenarien bei $M = 2.09$ ($SD = 0.16$) und nach den Szenarien bei $M = 2.14$ ($SD = 0.17$) auf einer Skala von 1 (volle Ablehnung von positiven Aussagen über die Automation) bis 3 (volle Zustimmung zu positiven Aussagen über die Automation).

4.5.2. Erste Reaktionen auf den TOR und auf das Event

Die ersten Reaktionen nach der Ausgabe des TOR und nach dem Eintreten des Events wurden in den Szenarien und Versuchsgruppen in die Kategorien *Keine Reaktion*, *Betätigen des Hebels zum Abschalten der Automation*, *Nur Lenken*, *Nur Bremsen* und *Lenken und Bremsen* klassifiziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 als prozentuale Anteile der Reaktionen für die unterschiedlichen Übernahmeszenarien für die erste Reaktion nach dem TOR und für die erste Reaktion nach dem Event dargestellt. In Abbildung 21 sind diese ersten Reaktionen noch einmal für die einzelnen Versuchsgruppen abgebildet.

Als erste Reaktion auf den TOR wurde die Automation in Szenario *M03* am häufigsten mit dem Hebel ausgeschaltet ($n = 35$ Fahrten), gefolgt von den Situationen *M02* und *M01* (jeweils $n = 33$ Fahrten) und *M05* ($n = 30$ Fahrten). Am seltensten wurde diese Möglichkeit zum Abschalten der Automation in Szenario *M04* genutzt ($n = 20$ Fahrten). Hier wurde dafür häufiger die Möglichkeit des Abschaltens über die Bremse verwendet ($n = 34$ Fahrten). Diese Möglichkeit nutzten die Fahrer in den Szenarien *M05* ($n = 17$ Fahrten), *M02* ($n = 14$ Fahrten), *M01* ($n = 11$ Fahrten) und *M03* ($n = 10$ Fahrten) seltener. Ein je nach Szenario unterschiedlicher Anteil der Fahrer zeigte außerdem zunächst keine Reaktion, wobei diese Fahrer fast ausschließlich in der manuell fahrenden Versuchsgruppe zu finden waren ($n = 57$ Fahrten), und somit für sie keine unmittelbare Reaktion erforderlich war. Bezogen auf die automatisierten Versuchsgruppen verwendeten die Fahrer häufiger den Hebel als die Bremse um die Automation abzuschalten ($n = 54$ Fahrten in der Gruppe *Überwacht*, $n = 48$ Fahrten in der Gruppe *Lesen* und $n = 49$ Fahrten in der Gruppe *Spiel*). Über die Bremse wurde die Automation in $n = 18$ Fahrten (*Überwacht*), $n = 25$ Fahrten (*Lesen*) und $n = 26$ Fahrten (*Spiel*) abgeschaltet.

Bei den ersten Reaktionen auf das Event unterschieden sich die Szenarien sehr deutlich in ihrer häufigsten ersten Reaktion mit $n = 54$ Fahrten in denen nur gelenkt wurde in Szenario *M01*, jeweils $n = 22$ Fahrten in denen gebremst und gelenkt wurde in den Szenarien *M02* und *M03*, gegenüber $n = 46$ Fahrten in denen gebremst und gelenkt wurde in Szenario *M04* und $n = 46$ Fahrten in denen ausschließlich gebremst wurde in Szenario *M05*. Sortiert nach Versuchsgruppen ergaben sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Anteilen der ersten Reaktionen nach dem Event.

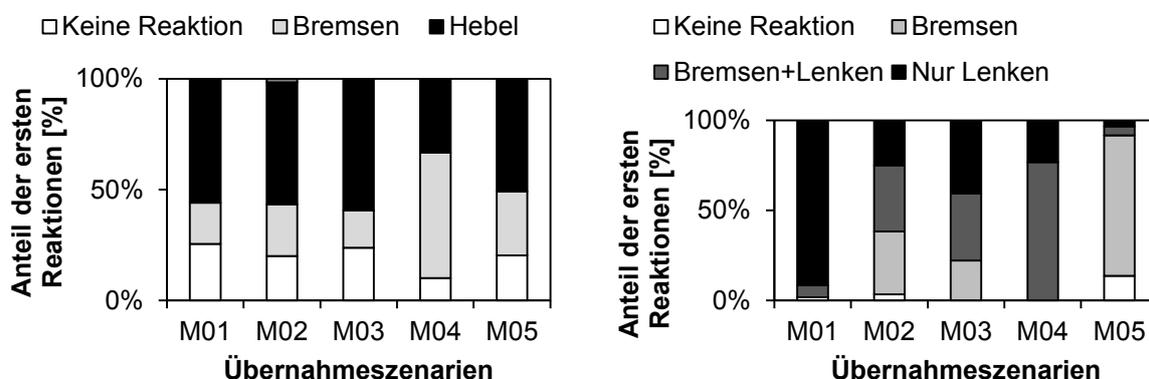


Abbildung 22: Anteilige erste Reaktionen auf den TOR (links) und auf das Event (rechts), sortiert nach Übernahme-szenarien.

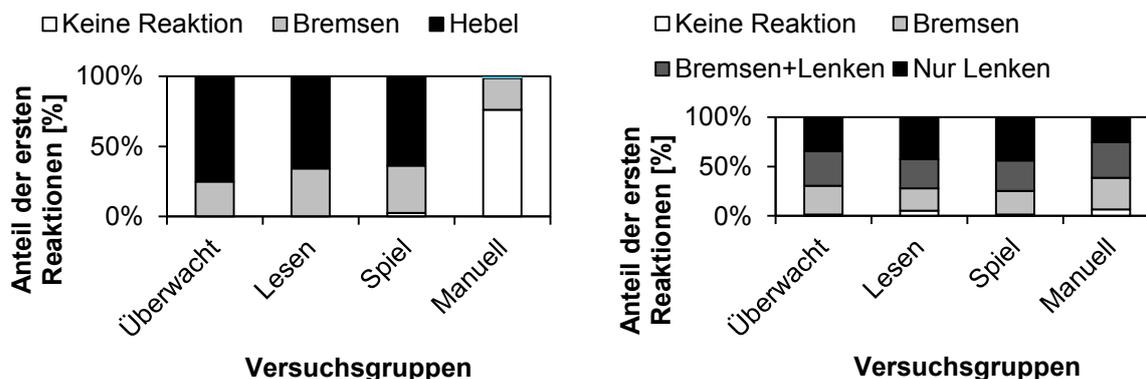


Abbildung 21: Anteilige erste Reaktionen auf den TOR (links) und auf das Event (rechts), sortiert nach Versuchsgruppen.

4.5.3. Reaktionszeiten

Es werden die Reaktionen auf den TOR und die Reaktionen auf das Event dargestellt, das in den Situationen jeweils 5.25 Sekunden/175 Meter nach der Ausgabe des TOR ausgelöst wurde.

Für das Abschalten der Automation gab es einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Versuchsgruppen *Überwacht*, *Lesen* und *Spiel* ($F(2,41) = 16.32, p < .05$), mit mittleren Reaktionszeiten von $M = 2.42$ ($SD = 1.17$), $M = 4.60$ ($SD = 1.97$) und $M = 5.14$ ($SD = 1.93$) Sekunden respektive. Ein paarweiser Vergleich fand einen Unterschied zwischen der Gruppe *Überwacht* und den beiden Gruppen mit Nebenaufgaben, aber keinen Unterschied zwischen den Gruppen *Lesen* und *Spiel*. Es wurde kein Interaktionseffekt zwischen den Versuchsgruppen und den Übernahmeszenarien gefunden. Es gab außerdem keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Übernahmeszenarien. Die mittleren Reaktionszeiten bis zum Abschalten der Automation in den Übernahmeszenarien und den Versuchsgruppen ist in Tabelle 9 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Die Zeit bis zum Abschalten der Automation ist in Abbildung 23 noch einmal grafisch aufbereitet, wobei hier um einen Überblick über die Verteilung der Reaktionen der einzelnen Fahrer zu geben der prozentuale Anteil der Fahrer (Y-Achse) dargestellt wurde, die relativ zu der seit dem TOR verstrichenen Zeit (X-Achse) die Automation abgeschaltet hatten. Die Grafik kann also beispielsweise so gelesen werden: Ca. 3.5 Sekunden nach dem TOR

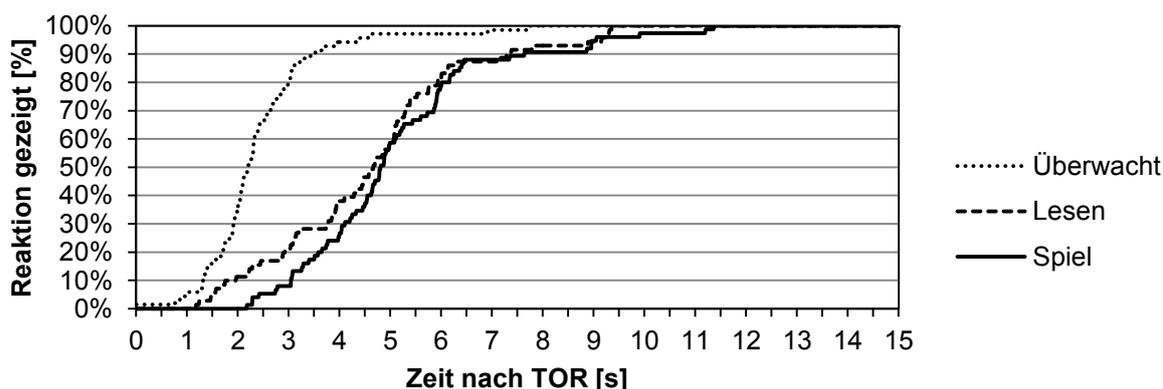


Abbildung 23: Prozentualer Anteil der Reaktion „Ausschalten der Automation“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit.

hatten etwa 90% der Testfahrer in der Gruppe *Überwacht* die Automation abgeschaltet. Diese Art der Darstellung wurde auch für die folgenden Reaktionen gewählt, da leicht einige weitere deskriptive statistische Maße aus den Darstellungen abgeleitet werden können. Die Steilheit der sich ergebenden Verläufe repräsentiert die Streuung der Reaktionen über die Zeit. Ein sehr steiler Verlauf bedeutet somit eine geringe Streuung, während ein flacher Verlauf auf eine starke Streuung hindeutet. Plateaus in den Verläufen können ein Hinweis auf eine Aufteilung der Stichprobe in verschiedene Verhaltens-Gruppen sein. Von links nach rechts gelesen ergeben die Verläufe die typische Reihenfolge der Reaktionen innerhalb einer Versuchsgruppe, wobei sich schneidende Verläufe auf eine ungleichmäßige Reihenfolge der Reaktionen hindeuten. Als Limit für die Darstellung der Reaktionsverläufe wurde im Sinne einer besseren Lesbarkeit und Vergleichbarkeit der Grafiken eine Zeitspanne von 0 bis 15 Sekunden nach dem TOR gewählt. Einige Reaktionen, insbesondere die Blicke in den

Spiegel und die Blicke auf die Geschwindigkeitsanzeige liegen hierdurch außerhalb des dargestellten Bereichs.

Tabelle 9: Mittlere Reaktionszeiten und Standardabweichungen (in Klammern) in Sekunden bis zum Abschalten der Automation für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.

Faktor A: Art der Nebenaufgabe (zwischen den Gruppen)	Faktor B: Art der Übernahmesituation (innerhalb der Personen)				
	Szenario M01	Szenario M02	Szenario M03	Szenario M04	Szenario M05
<i>Überwacht</i>	2.82 (1.55)	2.69 (1.33)	2.62 (0.97)	1.62 (0.77)	2.26 (0.78)
<i>Lesen</i>	4.58 (2.00)	4.94 (1.23)	4.87 (1.38)	4.51 (2.50)	4.10 (2.51)
<i>Spiel</i>	5.46 (1.86)	5.18 (2.08)	5.04 (2.05)	5.04 (2.37)	4.99 (1.41)

Als zusätzliche Hinweise auf die Zeit bis zu verschiedenen Reaktionen nach einem TOR wurden der erste Blick auf die Straße, die Zeit bis mindestens eine Hand das Lenkrad umfasst, die Reaktionsbereitschaft an den Pedalen, der erste Blick in den Spiegel und der erste Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige untersucht.

Bezogen auf den ersten Blick auf die Straße nach dem TOR wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsgruppen gefunden ($F(2,41) = 24.68$, $p < .05$). Die mittleren Reaktionszeiten bis zu dem ersten Blick auf die Straße lagen bei $M = 0.12$ ($SD = 0.28$) Sekunden für die Gruppe *Überwacht*, bei $M = 1.14$ ($SD = 1.12$) Sekunden für die Gruppe *Lesen* und bei $M = 1.90$ ($SD = 1.23$) Sekunden für die Gruppe *Spiel*. Ein paarweiser Vergleich der Reaktionszeiten ergab signifikante Unterschiede zwischen allen einzelnen Versuchsgruppen. Die Gruppe *Manuell* wurde nicht in die Auswertung mit einbezogen, da in dieser Gruppe zum Zeitpunkt des TOR alle Probanden den Blick bereits auf die Straße gerichtet hatten. Die Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf die Straße sind in Abbildung 24 noch einmal für die Versuchsgruppen dargestellt.

Ein signifikanter Haupteffekt wurde für diese Variable außerdem für den Faktor

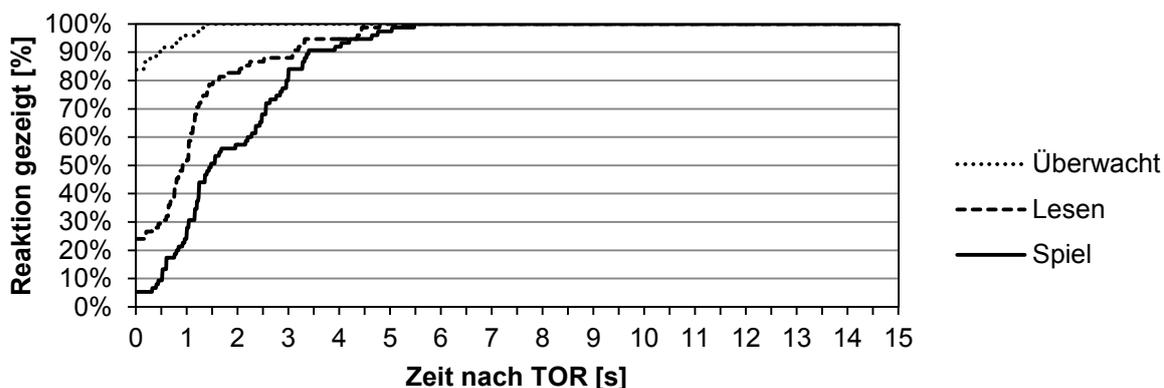


Abbildung 24: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Straße“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit.

Übernahmeszenario gefunden ($F(4,164) = 4.18, p < .05$). Geordnet nach den Übernahmeszenarien lagen die mittleren Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf die Straße bei $M = 1.14$ ($SD = 1.28$) Sekunden für das Szenario *M01*, bei $M = 1.36$ ($SD = 1.39$) Sekunden für das Szenario *M02*, bei $M = 1.25$ ($SD = 1.39$) Sekunden für das Szenario *M03*, bei $M = 1.00$ ($SD = 1.23$) Sekunden für das Szenario *M04* und bei $M = 0.72$ ($SD = 0.88$) Sekunden für das Szenario *M05*. Ein paarweiser Vergleich zwischen Übernahmeszenarien zeigte einen Unterschied zwischen den Szenarien *M02* und *M05* sowie zwischen den Szenarien *M03* und *M05* mit jeweils kürzeren Reaktionszeiten in Szenario *M05*. Es wurde kein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Versuchsgruppe und Übernahmeszenario gefunden.

Die Hand- und Fußbewegungen wurden mit Hilfe von Beobachtungskameras erfasst und anhand der in Abschnitt 4.3.5.1 aufgestellten Kriterien klassifiziert. Für das erste Umfassen des Lenkrads mit mindestens einer Hand zeigten sich signifikante Haupteffekte für die Faktoren Versuchsgruppe ($F(2,38) = 12.84, p < .05$) und Übernahmeszenario ($F(4,152) = 9.93, p < .05$), aber keine Interaktion zwischen diesen Faktoren. Die mittleren Reaktionszeiten für diesen Messwert lagen bei $M = 1.62$ ($SD = 0.69$) Sekunden für die Gruppe *Überwacht*, bei $M = 3.28$ ($SD = 1.75$) Sekunden für die Gruppe *Lesen* und bei $M = 3.90$ ($SD = 1.48$) Sekunden für die Gruppe *Spiel*. Ein paarweiser Vergleich zwischen den Reaktionszeiten der Gruppen zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Gruppe *Überwacht* und den Gruppen *Lesen* und *Spiel*, aber keinen Unterschied zwischen den Gruppen *Lesen* und *Spiel*. Hinsichtlich der verschiedenen Übernahmeszenarien lagen die Reaktionszeiten bei $M = 3.39$ ($SD = 1.64$) Sekunden für das Szenario *M01*, bei $M = 3.39$ ($SD = 1.83$) Sekunden für das Szenario *M02*, bei $M = 3.19$ ($SD = 1.56$) Sekunden für das Szenario *M03*, bei $M = 2.43$ ($SD = 1.76$) Sekunden für das Szenario *M04* und bei $M = 2.70$ ($SD = 1.64$) Sekunden für das Szenario *M05*. Ein paarweiser Vergleich der Szenarien ergab nachweisbare Unterschiede zwischen dem Szenario *M04* im Vergleich zu den Szenarien *M01*, *M02* und *M03* sowie zwischen dem Szenario *M05* und den Szenarien *M01*, *M02* und *M03*. Die Zeit bis zu „Hände am Lenkrad“ ist in der Abbildung 27 noch einmal für die unterschiedlichen Versuchsgruppen sowie in Abbildung 25 für die unterschiedlichen Szenarien dargestellt.

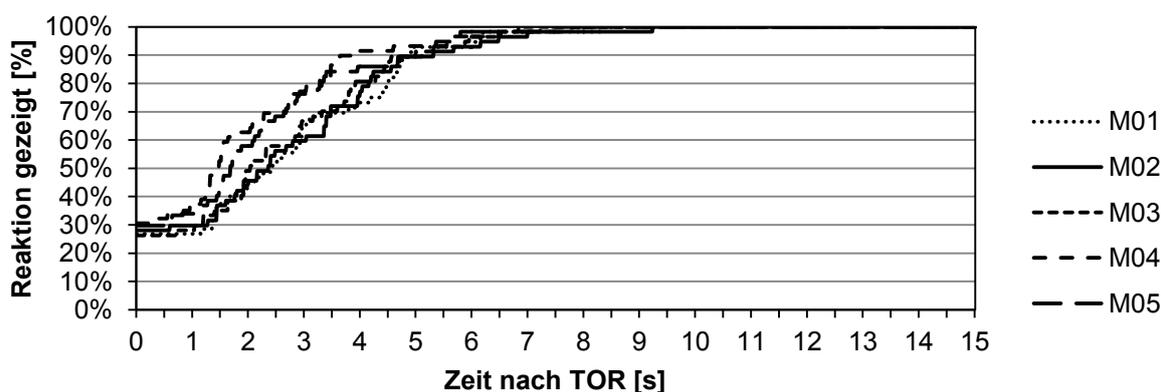


Abbildung 25: Prozentualer Anteil der Reaktion „Hände am Lenkrad“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.

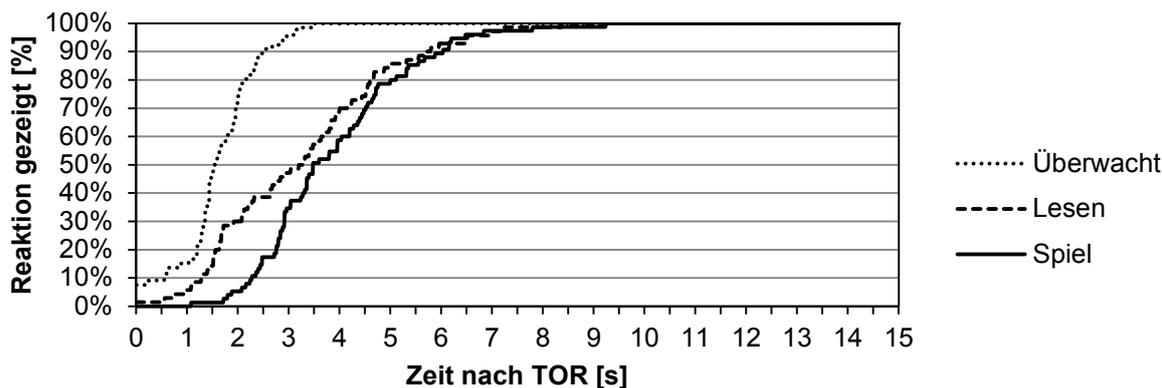


Abbildung 27: Prozentualer Anteil der Reaktion „Hände am Lenkrad“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.

Die Fußbewegungen wurden mit einer Beobachtungskamera im Fußraum der Sitzkiste erfasst und anhand der in Abschnitt 4.3.5.1 aufgestellten Kriterien klassifiziert. Die erste Berührung der Pedale mit dem Fuß bzw. das stabile Bereithalten eines Fußes über einem Pedal wurden als Reaktion „Fuß an den Pedalen“ gewertet. Für diese Reaktion zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen ($F(2,37) = 8.55, p < .05$) und zwischen den Übernahmeszenarien ($F(4,148) = 7.27, p < .05$). Es lag keine Interaktion zwischen den Faktoren vor. Ein paarweiser Vergleich ergab nachweisbare Unterschiede zwischen der Gruppe *Überwacht* ($M = 2.20, SD = 0.98$) und den Gruppen *Lesen* ($M = 3.86, SD = 2.13$) und *Spiel* ($M = 4.41, SD = 1.76$). Für die verschiedenen Übernahmeszenarien

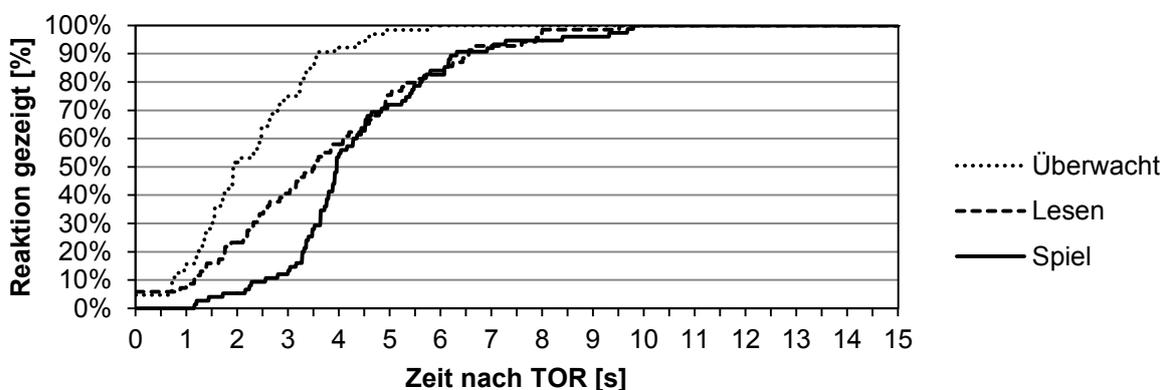


Abbildung 26: Prozentualer Anteil der Reaktion „Fuß an den Pedalen“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.

ergaben sich für diesen Parameter bei einem paarweisen Vergleich Unterschiede zwischen dem Szenario *M04* ($M = 2.86, SD = 2.09$) und den Szenarien *M01* ($M = 3.98, SD = 1.92$), *M02* ($M = 3.87, SD = 1.96$) und *M03* ($M = 3.79, SD = 1.70$). Das Szenario *M05* ($M = 3.33, SD = 2.02$) war hinsichtlich der Reaktionszeit für „Fuß an den Pedalen“ nicht eindeutig von den anderen Szenarien zu unterscheiden. Die Zeit bis zu der Reaktion „Fuß an den Pedalen“ ist in Abbildung 26 noch einmal für die einzelnen Versuchsgruppen dargestellt.

Die im Folgenden dargestellten Reaktionen „Blick in den Seitenspiegel“ und „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ beziehen sich möglicherweise nur in Teilen auf den TOR und können auch als Reaktionen auf das Event bei Sekunde 5.25/Meter 175 nach dem TOR gewertet werden. In die Analyse dieser Reaktionen wurde außerdem zusätzlich zu den

Versuchsgruppen *Überwacht*, *Lesen* und *Spiel* die Gruppe *Manuell* einbezogen, da für diesen Parameter auch in dieser Gruppe auswertbare Reaktionen von den Probanden gezeigt wurden.

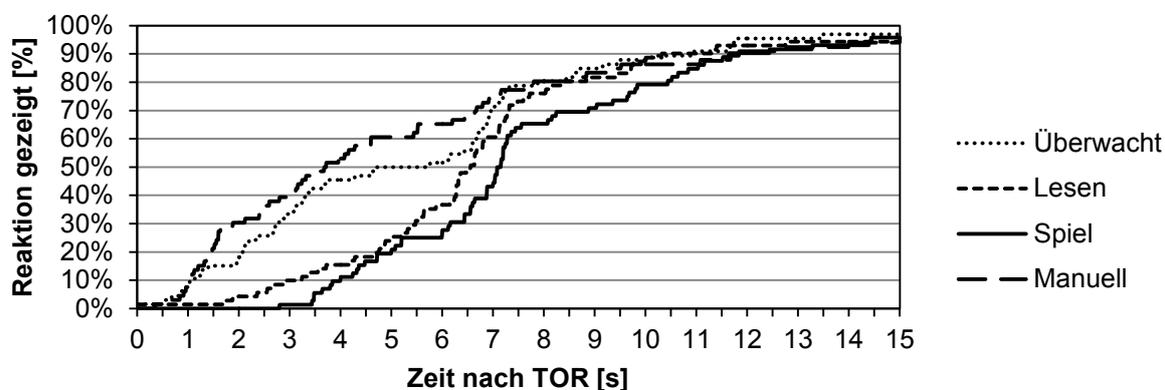


Abbildung 28: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.

Für die Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ gab es einen signifikanten Unterschied zwischen den Versuchsgruppen ($F(3,36) = 3.65$, $p < .05$) und zwischen den Übernahmeszenarien ($F(4,144) = 14.12$, $p < .05$). Es lag keine Interaktion zwischen den Faktoren vor. Ein paarweiser Vergleich ergab nachweisbare Unterschiede zwischen der Gruppe *Spiel* ($M = 7.80$, $SD = 2.56$) und der Gruppe *Manuell* ($M = 4.94$, $SD = 3.75$). Für die Gruppen *Überwacht* ($M = 5.57$, $SD = 3.43$) und *Lesen* ($M = 7.01$, $SD = 2.85$) wurden keine Unterschiede gefunden. Bezogen auf die verschiedenen Übernahmeszenarien ergaben sich für diesen Parameter bei einem paarweisen Vergleich Unterschiede zwischen dem Szenario *M04* ($M = 4.47$, $SD = 2.66$) und den Szenarien *M01* ($M = 6.09$, $SD = 2.60$), *M02* ($M = 6.58$, $SD = 3.83$), *M03* ($M = 6.37$, $SD = 3.89$) und *M05* ($M = 9.31$, $SD = 4.31$) sowie zwischen dem Szenario *M05* und den Szenarien *M01*, *M02*, *M03* und *M04*. Die Zeit bis zu der Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ ist in Abbildung 28 noch einmal für die unterschiedlichen Versuchsgruppen sowie in Abbildung 29 für die einzelnen Szenarien dargestellt.

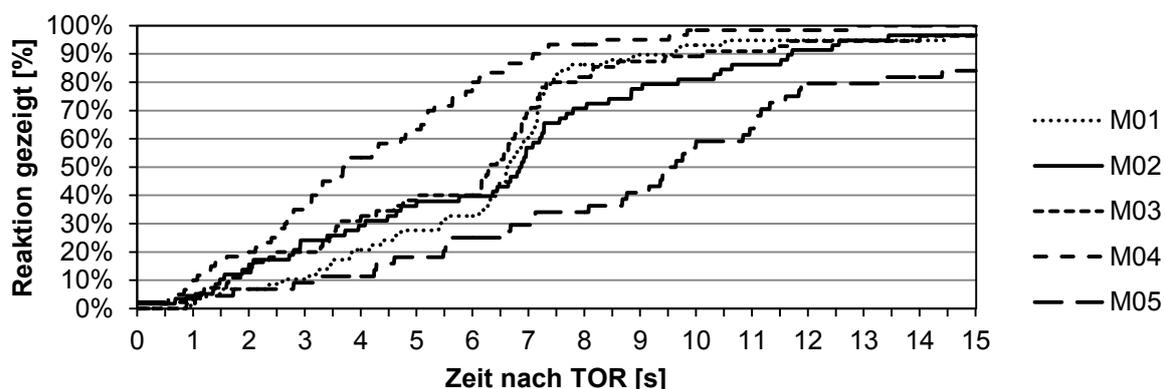


Abbildung 29: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick in den Seitenspiegel“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.

Die Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ wurde wieder mithilfe des Blickbewegungssystems gemessen als erster Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige nach

dem TOR. Für diesen Messwert wurden sowohl signifikante Effekte für den Faktor Versuchsgruppe ($F(3,41) = 5.43, p < .05$) als auch für den Faktor Szenario ($F(4,164) = 9.17, p < .05$) gefunden, jedoch keine Interaktion zwischen den beiden Faktoren. Paarweise Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen lagen für die Gruppe *Spiel* ($M = 10.42, SD = 5.56$) im Vergleich zu den Gruppen *Überwacht* ($M = 6.21, SD = 4.48$) und *Manuell* ($M = 6.71, SD = 6.07$) vor. Die Reaktionszeiten der Gruppe *Lesen* ($M = 9.33, SD = 4.44$) unterschieden sich nicht statistisch signifikant von den anderen Gruppen. Die Zeit bis zu der Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ ist sortiert nach den Versuchsgruppen in Abbildung 30 dargestellt.

Ein paarweiser Vergleich zwischen den Übernahmeszenarien ergab Unterschiede zwischen dem Szenario *M04* ($M = 12.87, SD = 8.55$) und den Szenarien *M01* ($M = 6.83, SD = 4.95$), *M02* ($M = 8.20, SD = 5.62$), *M03* ($M = 7.77, SD = 4.33$) und *M05* ($M = 6.91, SD = 4.46$). Die Reaktionszeiten bis zu dem Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige sind in Abbildung 31 noch einmal sortiert nach den Szenarien dargestellt.

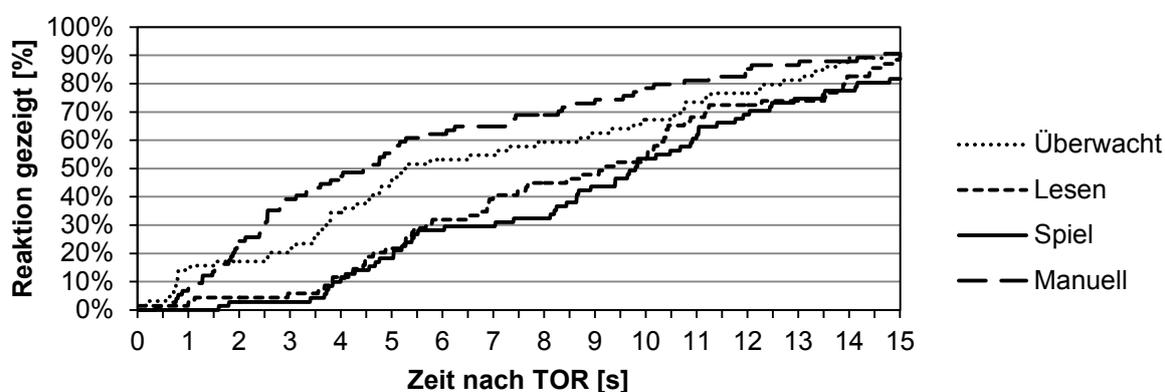


Abbildung 30: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.

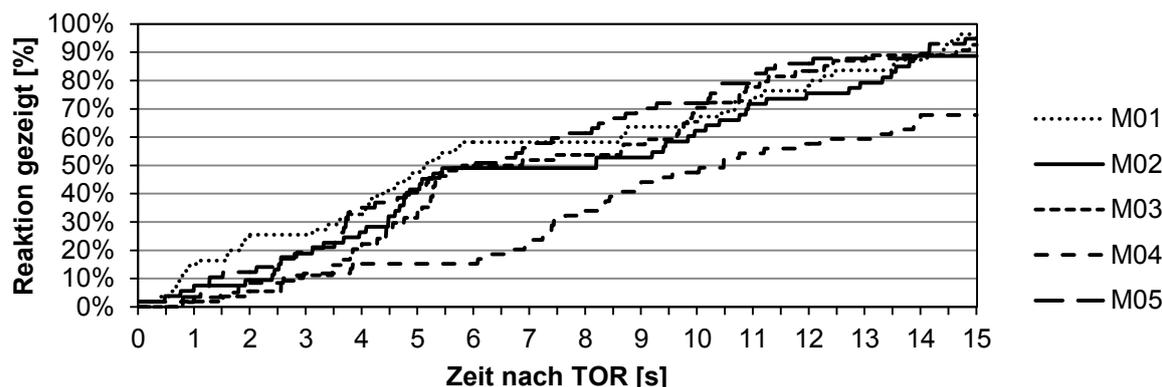


Abbildung 31: Prozentualer Anteil der Reaktion „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Übernahmeszenarien.

Als zusätzliches Maß für die Reaktionsbereitschaft auf das Event nach einem TOR wurde der Zeitpunkt der Bremsreaktion nach dem Event erhoben. Als eine Bremsreaktion wurde entsprechend Abschnitt 4.3.5.1 ein Betätigen des Bremspedals von mindestens 10% des möglichen Pedalwegs definiert. Die im Folgenden dargestellten Bremsreaktionen sollen nur

die Reaktionen nach dem Event widerspiegeln, entsprechend wurde nur solche Reaktionen berücksichtigt die auf das Event folgten. Es wurden zwischen den Gruppen sowie zwischen den Übernahmeszenarien keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bremsreaktionszeiten nach dem Event gefunden. Hierzu ist zu beachten, dass die Bremsreaktionszeiten auf das Event nur für die Szenarien *M02*, *M03* und *M05* sinnvoll ausgewertet werden konnten, da für das Szenario *M01* zu wenige dieser Reaktionen auftraten und in Szenario *M04* die Bremsreaktionszeiten nicht von den Reaktionen auf den TOR und das automatische Verzögern der Automation getrennt werden konnten. Die Bremsreaktionszeiten aus den drei verwertbaren Szenarien sind in Abbildung 33 für die einzelnen Versuchsgruppen standardisiert an den gefahrenen Metern nach dem Auftreten des Events und in Abbildung 32 standardisiert an der Zeit nach dem TOR dargestellt.

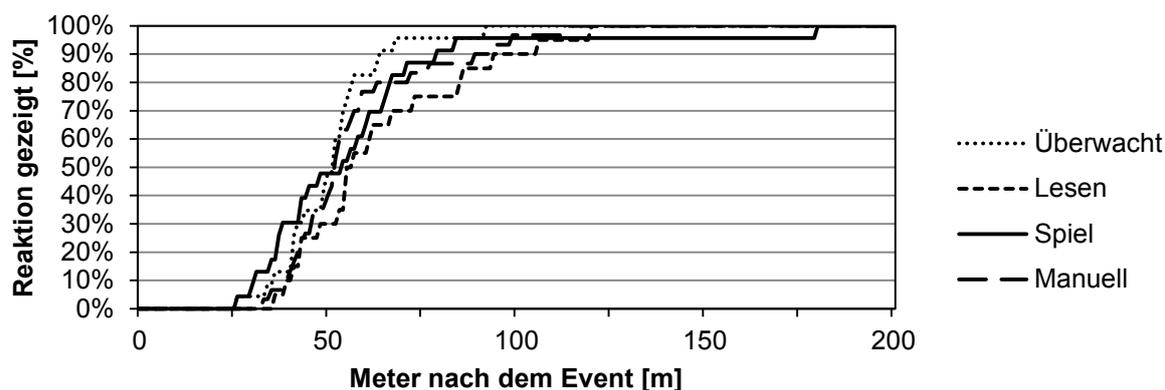


Abbildung 33: Prozentualer Anteil der Reaktion „Bremsreaktion auf das Event“ nach dem Event gemessen an den gefahrenen Metern, sortiert nach Versuchsgruppen.

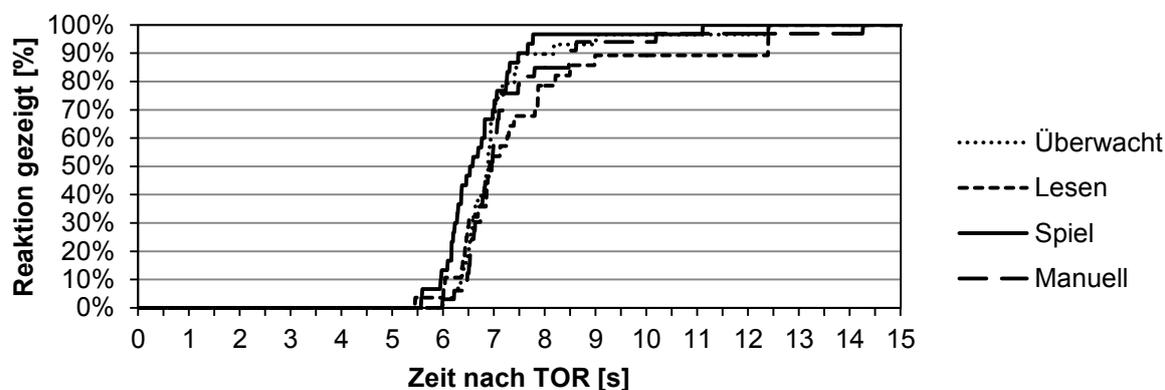


Abbildung 32: Prozentualer Anteil der Reaktion „Bremsreaktion auf das Event“ nach dem TOR gemessen an der vergangenen Zeit, sortiert nach Versuchsgruppen.

Die Probanden bremsen in den untersuchten Szenarien im Durchschnitt $M = 1.71$ ($SD = 0.81$) Sekunden nach dem Event (*Überwacht*: $M = 1.61$ ($SD = 0.47$) Sekunden; *Lesen*: $M = 1.88$ ($SD = 0.79$) Sekunden; *Spiel*: $M = 1.73$ ($SD = 1.04$) Sekunden; *Manuell*: $M = 1.89$ ($SD = 0.85$) Sekunden). Die Durchschnittlichen Bremsreaktionszeiten nach dem Event für die einzelnen Szenarien lagen bei $M = 1.85$ ($SD = 0.99$) Sekunden für *M02*, bei $M = 1.75$ ($SD = 0.84$) Sekunden für *M03* und bei $M = 1.74$ ($SD = 0.60$) Sekunden für *M05*.

Die Reaktionen auf den TOR scheinen sich bezogen auf die ersten Reaktionen „Blick auf die Straße“, „Hände am Lenkrad“, „Fuße auf den Pedalen“ und „Abschalten der Automation“ zwischen den Gruppen zwar in der jeweiligen Dauer, nicht aber in der grundsätzlichen Reihenfolge zu unterscheiden. Unterschiede hinsichtlich der Reihenfolge zeigen sich jedoch bei den Reaktionen „Blick in den Seitenspiegel“ und „Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige“. Während in den automatisierten Gruppen nach dem Event der Blick in den Spiegel priorisiert wurde und entsprechend der Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige später stattfindet, laufen diese Reaktionen in der manuellen Fahrt auch nach dem Event noch nahezu parallel weiter. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Szenario *M04* im Vergleich zu dem Szenario *M05*. Hier scheint in Szenario *M04* eine deutliche Priorisierung des Blicks in den Spiegel stattzufinden, während der Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige zunächst vernachlässigt wird. Ein genau umgekehrtes Bild ergibt sich für das Szenario *M05*, in dem deutlich der Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige dem Blick in den Spiegel vorangestellt wird.

Um einen Eindruck über die Reihenfolge der Reaktionen nach dem TOR zu geben sind die Reaktions-Verläufe aller gemessenen Handlungen in Anhang 7.8 und 7.9 noch einmal in zusammenfassenden Grafiken (alle Reaktionen in den verschiedenen Versuchsgruppen; alle Reaktionen in den verschiedenen Szenarien) ergänzend dargestellt.

4.5.4. Fahrdaten

Im Folgenden werden Fahrdaten aus dem Simulator analysiert die zusätzlich zu den Reaktionszeiten Hinweise auf die Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung sowie auf das Verhalten nach einer Übernahmeaufforderung geben sollen. Entsprechend der Definition der Kriterien in Abschnitt 4.3.5.2 wurden sowohl mittlere Werte über eine bestimmte Zeit ermittelt (Geschwindigkeiten, Intensität der Bremsreaktion, Abstand zum Vorderfahrzeug, maximale Beschleunigungswerte) sowie absolute Kriterien aufgestellt die auf Schwierigkeiten bei der Übernahme der manuellen Steuerung hinweisen (Kollisionen, starke Bremsungen, Stoppen des Fahrzeugs, Eingriffe der Automation in die Steuerung).

Anknüpfend an die Geschwindigkeit der Bremsreaktion, die in Abschnitt 4.5.1 dargestellt wurde, sollen im Folgenden auch die Intensitäten der Bremsreaktionen betrachtet werden. Für die dargestellten Geschwindigkeiten der Bremsreaktionen wurde ein Schwellwert von 10% des maximalen Durchtretens des Bremspedals gewählt. Für die Intensitäten der Bremsreaktionen wurde kein solcher Schwellwert gewählt, sondern alle Bremsungen in einem Zeitraum von 100 Metern nach dem Event betrachtet. Für diese Betrachtung wurde das Szenario *M01* ausgeschlossen, da hier keine Bremsreaktion zur Bewältigung der Situation notwendig war und auch von den Probanden nur in einigen Fällen sehr schwache Bremsreaktionen gezeigt wurden. Des Weiteren wurde das Szenario *M04* losgelöst von den anderen Szenarien betrachtet, da die Bremsung hier in den meisten Fällen bereits vor dem Event durchgeführt wurde.

Für die statistische Analyse wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen gerechnet, wobei als Messwiederholungen die einzelnen Meter definiert waren zu denen die Variable Bremsdruck erhoben wurde. Auf diese Weise konnte ermittelt werden ob sich in der Interaktion zwischen Versuchsgruppen, Szenarien und Streckenmetern eine Veränderung der Variable Bremsdruck auf der Strecke nach dem Event ergab.

Für den Bereich von 100 Metern nach dem Event wurden zwischen den Szenarien *M02*, *M03* und *M05* keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zeitpunkten (Metern) und Intensitäten (Bremsdruck) für die einzelnen Szenarien festgestellt. Ebenso wurde kein

statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsgruppen *Überwacht*, *Lesen*, *Spiel* und *Manuell* gefunden. Die visuelle Betrachtung der Daten deutet auf einen leichten Effekt der Versuchsgruppe in Richtung eines geringeren Bremsdrucks für diesen Bereich in den Gruppen *Lesen* und *Spiel* hin. Der mittlere Bremsdruck der Stichprobe in den drei analysierten Situationen ist in Abbildung 34 geordnet nach den Versuchsgruppen für den Bereich von dem TOR (Meter 0) bis 500 Meter nach dem TOR dargestellt.

In dem Szenario M04 unterschied sich der Zeitpunkt der Bremsreaktionen deutlich von den Szenarien M02, M03 und M05, daher wurde für die statistische Analyse diese Situation separat betrachtet. Für den Bereich von 100 Metern nach dem Event ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Da in diesem Szenario jedoch vor einem teilweise auf der Spur stehenden Fahrzeug bei Meter 175 gebremst werden musste um eine Kollision zu vermeiden, wurden zusätzliche Bereiche vor und nach dem Event analysiert. Für den Bereich von 50 Metern vor dem Event bis 50 Meter nach dem Event (Meter 125-225) ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor *Versuchsgruppe*, $F(3,47) = 6.54$, $p < .05$. Ein paarweiser Vergleich der Versuchsgruppen deutete für das Szenario M04 in diesem Bereich auf einen höheren Bremsdruck in der manuellen fahrenden Gruppe im Vergleich zu den automatisiert gefahrenen Gruppen hin.

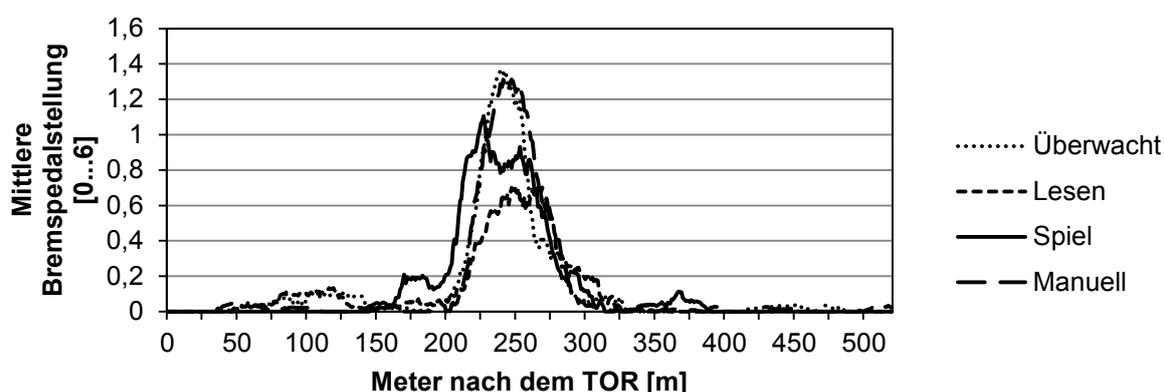


Abbildung 34: Mittlere Bremspedalstellungen in den Szenarien M02, M03 und M05 für die Versuchsgruppen Überwacht, Lesen, Spiel und Manuell gemessen an jedem Meter nach dem TOR. Das Event wurde in allen Situationen bei Meter 175 ausgelöst.

Auch die gewählte Geschwindigkeit nach dem TOR ist von den Zeitpunkten und Intensitäten der Bremsreaktionen abhängig, wird allerdings zusätzlich noch beeinflusst durch die Verwendung des Gaspedals sowie von den Eingriffen der Automation in den Übernahmeszenarien. Daher wurden die von den Probanden gefahrenen Geschwindigkeiten in den verschiedenen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien zusätzlich auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten untersucht. Die Geschwindigkeitsverläufe gemessen an den Streckenmetern sind für die Versuchsgruppen und die jeweiligen Übernahmeszenarien in Abbildung 35 dargestellt.

Die gefahrenen Geschwindigkeiten waren für jede Versuchsgruppe jeweils unterschiedlich zwischen den Übernahmeszenarien ($F(5,175316) = 130746.96$, $p < .05$), wobei das Szenario M04 durch die Reduzierung der vorgegebenen Geschwindigkeit von 120 km/h auf 60 km/h besonders herausstach und auch in Szenario M05 niedrigere Geschwindigkeiten als in den anderen Szenarien gewählt wurden. Für die Szenarien M01, M02, M03 und M05 konnten keine Unterschiede in den gewählten Geschwindigkeiten der einzelnen Versuchsgruppen nachgewiesen werden.

Das Szenario *M04* wurde aufgrund seines besonderen Aufbaus noch einmal separat analysiert, wobei sich für verschiedene Abschnitte des Geschwindigkeitsverlaufs signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ergaben. Für den Abschnitt von Meter 75 bis Meter 175, also 100 Meter vor dem verunfallten Fahrzeug auf der Fahrbahn, zeigte sich ein Unterschied zwischen der Gruppe *Manuell* und allen anderen Versuchsgruppen ($F(3,54) = 8.10, p < .05$). Auch nach dem Vorbeifahren an dem verunfallten Fahrzeug (Meter 175 bis Meter 275) war dieser Unterschied zwischen der Gruppe *Manuell* und den anderen Versuchsgruppen signifikant mit $F(3,54) = 5.61, p < .05$.

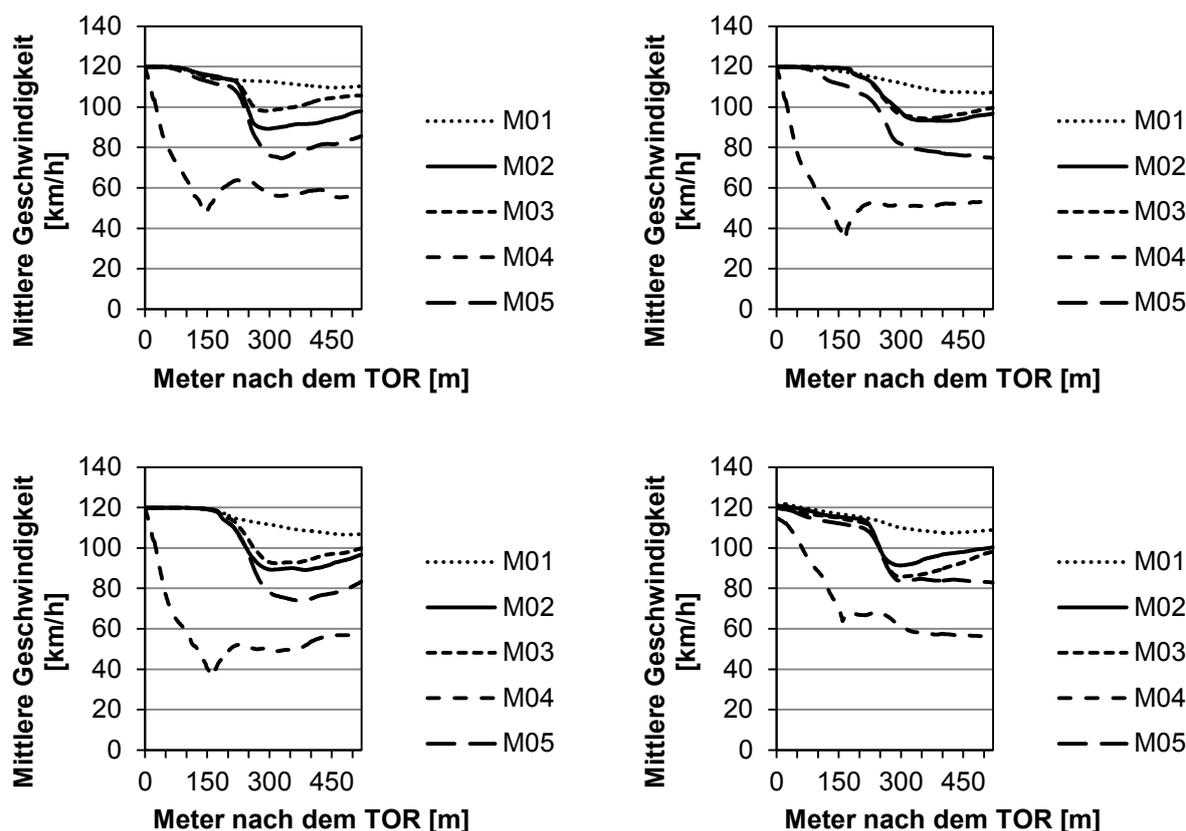


Abbildung 35: Geschwindigkeitsverläufe gemessen an den Streckenmetern nach dem TOR. Oben links: Versuchsgruppe *Überwacht*. Oben rechts: Versuchsgruppe *Lesen*. Unten links: Versuchsgruppe *Spiel*. Unten rechts: Versuchsgruppe *Manuell*.

Als ein weiteres Maß für die Sicherheit der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt wurden die mittleren Abstände zu dem vorausfahrenden Fahrzeug analysiert. Ähnlich zu den Bremspedalstellungen konnte der mittlere Abstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug nur für die Szenarien *M02*, *M03* und *M05* vergleichend ausgewertet werden, da in Szenario *M01* kein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden war und in Szenario *M04* der Abstand zu dem stehenden Unfallfahrzeug stetig bis zu dem Spurwechsel durch die Probanden kleiner wurde. Zwischen den analysierten Szenarien wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den mittleren Abständen gefunden. Ebenso ergab sich hier kein Effekt der Versuchsgruppe. Da die gefahrenen Abstände zwischen den einzelnen Personen sehr stark variierten und für die gemessenen Streckenmeter nicht normalverteilt waren, sind in Abbildung 36 beispielhaft für Szenario *M05* und alle

Versuchsgruppen der Median sowie das 1. und 3. Quartil des Abstandes zu dem vorausfahrenden Fahrzeug dargestellt.

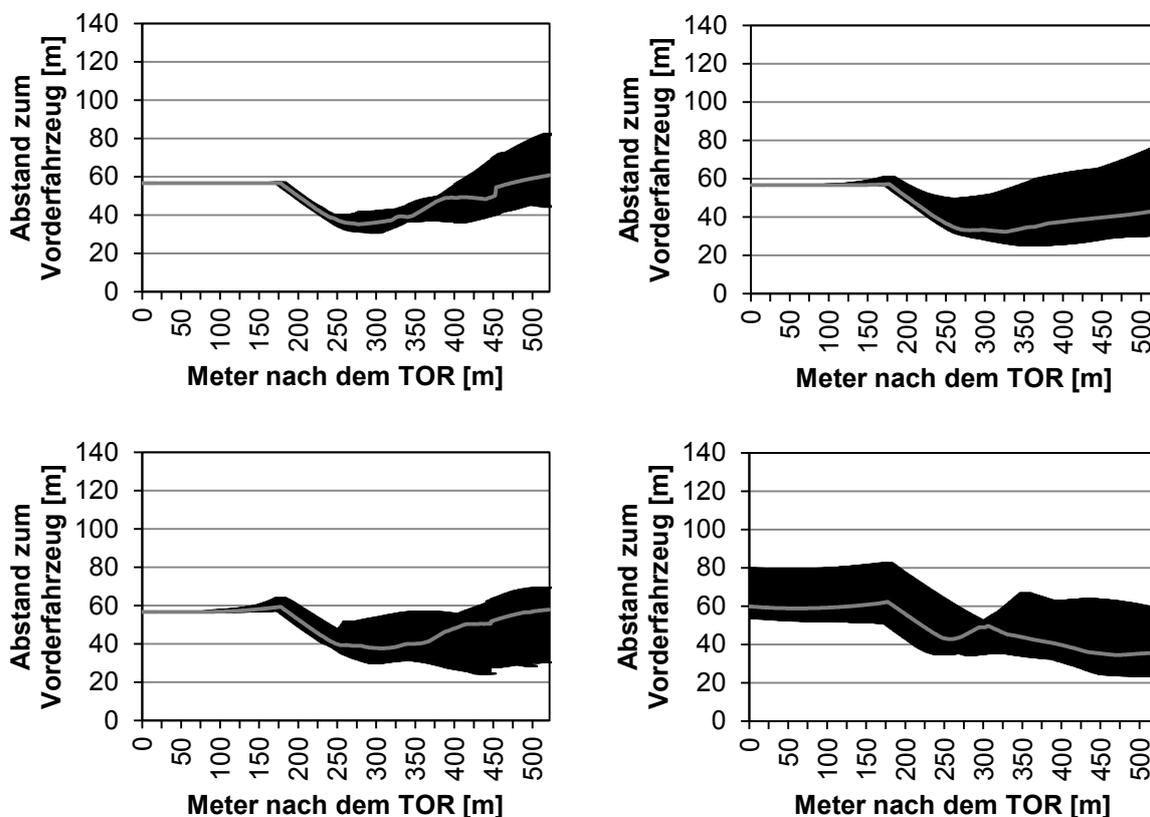


Abbildung 36: Mediane und 1./3. Quartile des Abstands zum Vorderfahrzeug gemessen an den Streckenmetern nach dem TOR. Oben links: Versuchsgruppe *Überwacht*. Oben rechts: Versuchsgruppe *Lesen*. Unten links: Versuchsgruppe *Spiel*. Unten rechts: Versuchsgruppe *Manuell*. Das Event wurde bei Meter 175 ausgelöst.

Auch eine Analyse der minimalen Abstände die innerhalb der Übernahmesituationen erreicht wurden ergab keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Mittlere minimale Abstände für alle Versuchsgruppen in den verschiedenen Szenarien lagen bei $M = 31.44$ ($SD = 11.60$) Metern.

Die maximalen Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung wurden als ein Indikator für die Kritikalität der Reaktionen in den verschiedenen Übernahmeszenarien und Versuchsgruppen erhoben. Die maximalen Beschleunigungen wurden jeweils in dem Bereich zwischen dem TOR und dem Event sowie in einem gleich langen Bereich nach dem Event analysiert.

Für die maximalen negativen Beschleunigungen in Längsrichtungen in dem Bereich zwischen dem TOR und dem Event wurde ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Versuchsgruppe ($F(3,274) = 2.83, p < .05$) gefunden. Ebenso wurde für diesen Bereich ein statistisch signifikanter Haupteffekt für den Faktor Szenario ($F(4,274) = 193.22, p < .05$), jedoch keine Interaktion zwischen diesen Faktoren festgestellt. Ein paarweiser Vergleich bestätigte diesen Effekt für den Unterschied zwischen den Versuchsgruppen *Manuell* ($M = -1.99, SD = 2.57 \text{ m/s}^2$) und *Überwacht* ($M = -2.60, SD = 3.12 \text{ m/s}^2$) sowie zwischen dem

Übernahmeszenario *M04* ($M = -7.39$, $SD = 1.87 \text{ m/s}^2$) und allen anderen Szenarien ($M = -1.11$, $SD = 1.49 \text{ m/s}^2$).

Für den Bereich nach dem Event wurde ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Übernahmeszenario gefunden ($F(4,274) = 31.12$, $p < .05$). Es wurden für diesen Bereich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen und kein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren nachgewiesen. Für den Faktor Übernahmeszenario zeigten paarweise Vergleiche signifikante Unterschiede nur zwischen dem Szenario *M01* ($M = -1.08$, $SD = 1.31 \text{ m/s}^2$) und allen anderen Szenarien ($M = -5.40$, $SD = 2.98 \text{ m/s}^2$).

Für die mittleren maximalen absoluten Querbeschleunigungen⁷ zwischen den TOR und dem Event zeigte sich ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Szenarien und den Versuchsgruppen ($F(12,274) = 1.864$, $p < .05$), sowie ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Versuchsgruppe ($F(3,274) = 6.49$, $p < .05$). Ein paarweiser Vergleich der Versuchsgruppen ergab einen nachweisbaren Unterschied zwischen der Gruppe *Überwacht* ($M = 0.58$, $SD = 0.38 \text{ m/s}^2$) und den Gruppen *Lesen* ($M = 0.38$, $SD = 0.44 \text{ m/s}^2$) und *Spiel* ($M = 0.32$, $SD = 0.42 \text{ m/s}^2$). Um die Interaktion zwischen den Faktoren Versuchsgruppe und Übernahmeszenario zu verdeutlichen sind die mittleren maximalen absoluten Querbeschleunigungen mit Standardabweichungen in Abbildung 37 noch einmal für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien dargestellt.

Der Bereich nach dem Event wurde zusätzlich auf maximale Querbeschleunigungen durchsucht. Es ergab sich ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Szenarien und den Versuchsgruppen ($F(12,274) = 3.37$, $p < .05$) und ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Übernahmeszenario ($F(4,274) = 7.11$, $p < .05$). Ein paarweiser Vergleich der Versuchsgruppen ergab einen nachweisbaren Unterschied zwischen dem Szenario *M05* ($M = 0.71$, $SD = 0.61 \text{ m/s}^2$) und allen anderen Übernahmeszenarien ($M = 1.37$, $SD = 1.03 \text{ m/s}^2$). Um die Interaktion zwischen den Faktoren Versuchsgruppe und Übernahmeszenario zu verdeutlichen sind die Werte in Abbildung 39 noch einmal dargestellt.

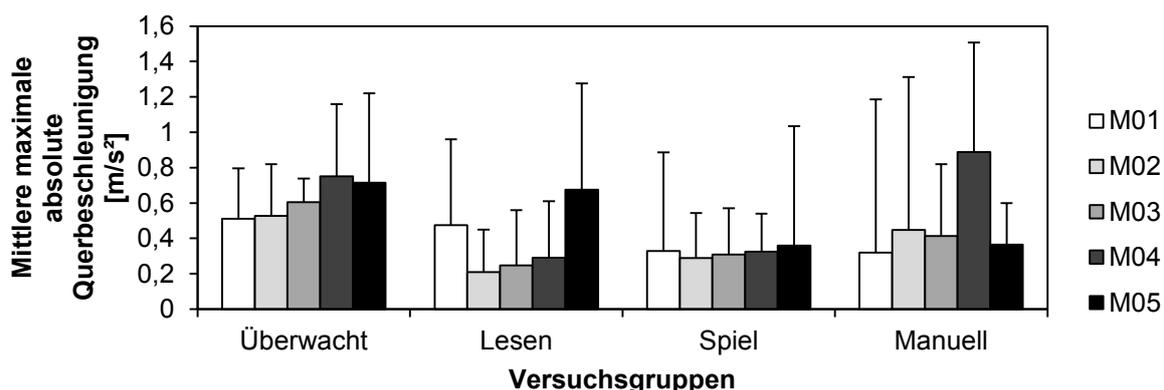


Abbildung 37: Mittlere maximale absolute Querbeschleunigung und Standardabweichungen zwischen dem TOR und dem Event für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.

⁷ $(\text{absolute positive maximale Querbeschleunigung} + \text{absolute negative Querbeschleunigung})/2$

Zusätzlich zu den über die Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien hinweg gemittelten Daten wurden auch kritische Ereignisse absolut ausgezählt, um auch eine Einschätzung hinsichtlich der aufgetretenen extremen Situationen zu ermöglichen. Hierzu gehörten zunächst die Kollisionen mit umgebendem Verkehr. Kollisionen wurden ausschließlich in Szenario *M04* festgestellt. Zu den meisten Kollisionen kam es in der Versuchsgruppe *Lesen* mit $n = 3$ Kollisionen, gefolgt von jeweils $n = 2$ Kollisionen in den Gruppen *Spiel* und *Manuell*. In der Gruppe *Überwacht* wurde keine Kollision registriert. Als weiteres kritisches Ereignis wurde das Anhalten (Geschwindigkeit < 10 km/h) eingestuft, das ebenfalls nur in Szenario *M04* registriert wurde. Dieses Ereignis wurde für die Versuchsgruppen *Manuell* und *Überwacht* jeweils $n = 4$ Fahrten, für die Versuchsgruppe *Spiel* $n = 5$ Fahrten und für die Versuchsgruppe *Lesen* in $n = 6$ Fahrten registriert. Zusätzlich wurde ein Kriterium für eine starke Bremsung/Vollbremsung aufgestellt, für die eine Kombination aus einem weit durchgetretenen Bremspedal und einer hohen negativen Beschleunigung eintreten musste. Hier wurde $n = 24$ (*Überwacht*), $n = 10$ (*Lesen*), $n = 26$ (*Spiel*) und $n = 18$ (*Manuell*) Fahrten gezählt, in denen das Kriterium während der Übernahmesituation erreicht wurde. Die Anzahl der registrierten Fahrten mit Kollisionen, die Anzahl der Fahrten mit Anhalten und die Anzahl der Starkbremsungen sind in Abbildung 38 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

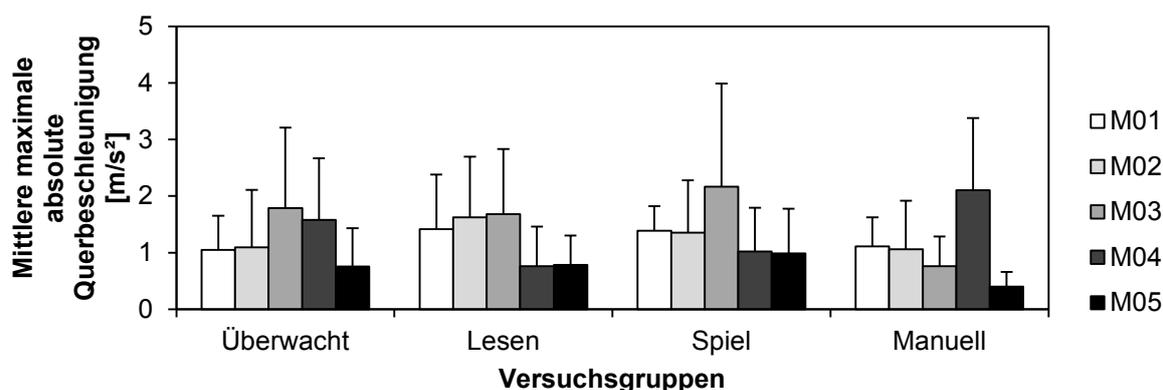


Abbildung 39: Mittlere maximale absolute Querbeschleunigung und Standardabweichungen nach dem Event für die einzelnen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien.

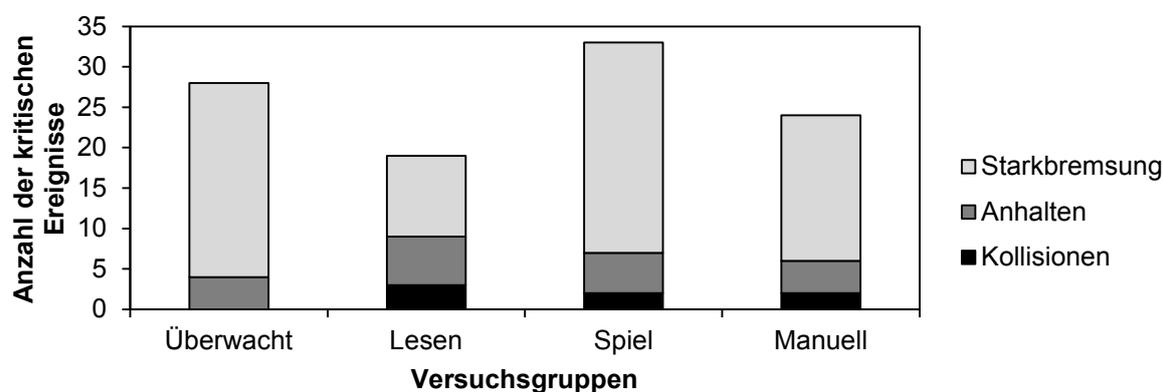


Abbildung 38: Anzahl der Fahrten mit den kritischen Ereignissen *Kollision*, *Anhalten* und *Starkbremsung* für die einzelnen Versuchsgruppen. Die kritischen Ereignisse *Kollision* und *Anhalten* wurden ausschließlich in Szenario *M04* gefunden, das Ereignis *Starkbremsung* über alle Szenarien hinweg.

Das Eingreifen der Automation in die Steuerung wurde ausgezählt um einen Hinweis auf die Notwendigkeit der in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Fähigkeiten der verwendeten Automation zu erhalten. Als Eingriffe der Automation wurden alle Situationen gewertet, in denen nach der Ausgabe des TOR eine Verzögerung der Geschwindigkeit stattfand während die Automation noch nicht von den Fahrern abgeschaltet worden war. In der Gruppe *Überwacht* griff die Automation in 23% der Fahrten in die Längsführung ein, in der Gruppe *Lesen* in 38% der Fahrten und in der Gruppe *Spiel* in 41% der Fahrten. Die Unterschiede zwischen den Gruppen waren statistisch signifikant ($\chi^2(2, N = 219) = 6.10, p < .05$). Ebenso ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Übernahmeszenarien ($\chi^2(4, N = 219) = 103.13, p < .05$), mit Eingriffen in 0% der Fahrten in Szenario *M01*, in 27% der Fahrten in Szenario *M02*, in 24% der Fahrten in Szenario *M03*, in 96% der Fahrten in Szenario *M04* und in 23% der Fahrten in Szenario *M05*.

Da in Szenario *M01* kein Eingriffe der Automation stattfanden und in *M04* in beinahe allen Fahrten durch die Automation verzögert wurde, wurden die Szenarien *M02*, *M03* und *M05* noch einmal separat auf Unterschiede hin untersucht. Der Unterschied zwischen der Gruppe *Überwacht* (2% Eingriffe) und den Gruppen *Lesen* (34% Eingriffe) und *Spiel* (36% Eingriffe) blieb auch nach Ausschluss dieser Szenarien bestehen ($\chi^2(2, N = 130) = 15.78, p < .05$). Der Anteil der Fahrten mit Eingriffen durch die Automation in den Szenarien *M02*, *M03* und *M05* ist in Abbildung 40 zusammen mit der mittleren Dauer der Eingriffe noch einmal grafisch dargestellt.

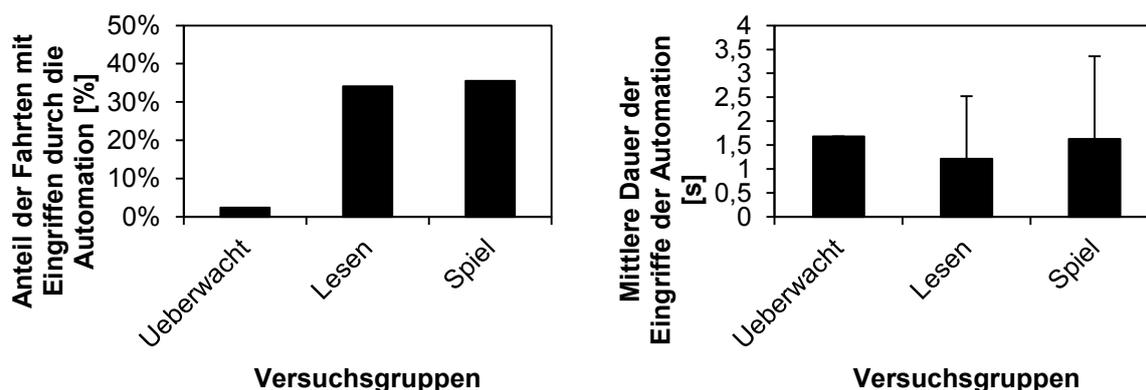


Abbildung 40: Links: Anteil der Fahrten mit Eingriffen durch die Automation in den Szenarien *M02*, *M03* und *M05* dargestellt für die Versuchsgruppen. Rechts: Mittlere Dauer der Eingriffe durch die Automation in den Szenarien *M02*, *M03* und *M05*.

4.6. Diskussion

Es wurde das Verhalten von Versuchspersonen in verschiedenen Übernahmeszenarien nach einer automatisierten Fahrt untersucht. Das Verhalten wurde jeweils in Abhängigkeit von der Art der Übernahmesituation und von der Art der Nebenaufgabe während der automatisierten Fahrt untersucht. Die zwei Nebenaufgaben auf einem Tablet-PC, *Lesen* und *Spiel*, wurden verglichen mit einer automatisierten Fahrt ohne Nebenaufgabe und einer manuellen Fahrt. In der manuellen Fahrt wurde zu dem Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung eine akustische Warnung ausgegeben, um eine Vergleichbarkeit mit den automatisierten Fahrten zu erzielen.

Es konnten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen und den Übernahmeszenarien hinsichtlich der Reaktionszeiten, dem Blickverhalten und dem Fahrverhalten nach der

Übernahmeaufforderung nachgewiesen werden. Weiterhin unterschieden sich die Szenarien bezogen auf die subjektiven Bewertungen durch die Probanden. Im Folgenden werden die gefundenen Unterschiede noch einmal kritisch betrachtet und in Bezug zu Ergebnissen aus bisherigen Studien zu der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer automatisierten Fahrt gesetzt.

4.6.1. Stichprobe und Versuchsbedingungen

Die für die Studie rekrutierte Stichprobe deckte eine breite Spanne an Altersgruppen ab. Im Vergleich zu dem aktuellen Bestand der Fahrerlaubnisse für PKW im Zentralen Fahrerlaubnis Register (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015) war die Altersgruppe zwischen 18 und 24 Jahren in der Stichprobe leicht unterrepräsentiert (18% gegenüber 30%) und die Altersgruppe von 45 bis 64 Jahren, sowie die Altersgruppe 65+ in der Stichprobe leicht überrepräsentiert (15% gegenüber 9% und 8% gegenüber 2%). Der Anteil der Altersgruppe von 25 bis 44 Jahren entsprach fast genau der Führerscheinstatistik (58% gegenüber 59%).

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Stichprobe in ihren altersbezogenen Leistungen weitgehend repräsentativ für die Gesamtpopulation der PKW-Führerscheinbesitzer in Deutschland ist. Diskutabel ist hierbei allerdings, ob diese Repräsentativität auch für die Population der möglichen ersten Käufer von Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen gegeben ist. Eine Analyse der Boston Consulting Group (Mosquet et al., 2015) deutet darauf hin, dass solche Funktionen zunächst von Käufern im Premium-Segment adaptiert werden, die gleichzeitig auch bereit sind höhere Preise für die Verfügbarkeit von automatisierten Fahrfunktionen zu bezahlen. Solche Käufergruppen entstammen generell eher einer älteren Population. Es steht also zu vermuten, dass zumindest zu Beginn der Markteinführung tendenziell ältere Personen häufiger mit Übernahmeaufforderungen konfrontiert werden.

Hinsichtlich der Geschlechterverteilung waren Frauen in der Stichprobe im Vergleich zu der Population der PKW-Führerscheinbesitzer unterrepräsentiert (22% gegenüber 50%), allerdings wurden bislang keine geschlechtsspezifischen Einflussfaktoren auf die Übernahme der Steuerung nach einer automatisierten Fahrt gefunden und werden auch nicht vermutet.

Bezogen auf die selbsteingeschätzte jährliche Fahrleistung lag die Stichprobe etwas unter den Einschätzungen in einer Analyse der Arbeitsgemeinschaft Verbrauchs- und Medienanalyse (VuMA, 2016). Die geringere Fahrleistung der Teilnehmer könnte einen Einfluss auf das Fahrverhalten nach einer Übernahmeaufforderung gehabt haben.

Es konnten keine eindeutigen Hinweise auf einen Einfluss der erhobenen demografischen Variablen (Alter, Geschlecht, Fahrleistung, Wissen über Automation) auf die Leistung bei der Übernahme der Steuerung festgestellt werden. Die Bewertung der Kritikalität und Beanspruchung in den Szenarien scheint in dieser Studie nicht durch die erhobenen demografische Variablen beeinflusst gewesen zu sein. Es wird somit vermutet, dass die berichteten Reaktionszeiten und Fahrdaten, die aus der Stichprobe entstanden sind, eine gute Einschätzung hinsichtlich des Verhaltens eines durchschnittlichen Fahrers ergeben. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Fahrergruppen, die bestimmte demografische Merkmale aufweisen (z.B. ein hohes Alter in Kombination mit einer geringen Fahrleistung) andere oder verzögerte Reaktionen in einer Übernahmesituation zeigen. Petermann-Stock et al. (2015) fanden bei einem Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeiten von älteren und jüngeren Fahrern nach einer automatisierten Fahrt verlangsamte Reaktionen bei den älteren Fahrern für die Zeit bis zu dem ersten Kontakt mit dem Lenkrad, bzw. mit den

Pedalen. Die daraus resultierende Verzögerung der Reaktion wurde in der Studie jedoch ausgeglichen durch schnellere Handlungsdurchführungen nach diesem ersten Kontakt.

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt. Trotz eines hohen Grades an Realismus in der Simulation und einer nahezu vollständigen Abdeckung des Gesichtsfeldes kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fahrer in einem realen Fahrzeug anders auf eine Übernahmeaufforderung reagieren als im Simulator. Etwas mehr als die Hälfte der veröffentlichten Studien zu diesem Thema wurden in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt, wodurch möglicherweise das Situationsbewusstsein im Fall einer Übernahme unterstützt und der Realfahrt angenähert wurde. Die berichteten mittleren Übernahmezeiten unterscheiden sich aber zwischen den dynamischen und den statischen Fahrsimulatoren nicht, bzw. nur sehr geringfügig mit einer Tendenz zu etwas längeren Übernahmezeiten in statischen Fahrsimulatoren.

Allgemein sind Fahrsimulatoren als ein valides Instrument zur Messung des Verhaltens anerkannt (Mullen, Charlton, Devlin und Bedard, 2011), wobei zwischen der relativen und der absoluten Validität der Daten aus solchen Versuchen unterschieden wird. Die relative Validität bezieht sich auf die Annäherung des Verhaltens von Probanden im Fahrsimulator an reales Verhalten, wodurch beispielsweise Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchsgruppen in einem Simulator gute Ergebnisse liefern. Die absolute Validität bezieht sich auf das exakte Replizieren von Daten im Vergleich zu Realfahrten. Hier sind nach Mullen et al. (2011) Einschränkungen zu erwarten, da auch hier Fahrsimulatoren zwar Annäherungen an die realen Fahrdaten liefern, diese aber nicht exakt replizieren. Die in dieser Studie ermittelten Fahrdaten und Reaktionszeiten sollten also als eben solche Annäherungen an reale Fahrdaten verstanden werden. Realfahrten mit automatisierten Fahrfunktionen müssen in Zukunft genutzt werden um diese Daten zu validieren und zu ergänzen.

Die Fähigkeiten der simulierten Automation waren den vermuteten Fähigkeiten von zukünftigen automatisierten Fahrsystemen für Autobahnen nachempfunden. Die Fähigkeiten des Systems wurden den Versuchsteilnehmern ausführlich erläutert und in einer Trainingsfahrt demonstriert. Die Fähigkeit des Systems einen risikominimalen Zustand herbeizuführen wurde den Fahrern bewusst nicht erklärt, um Reaktionen auf die Übernahmeaufforderung von allen Versuchsteilnehmern zu erhalten. Das Wissen über diese Fähigkeit des Systems hätte möglicherweise zu längeren Reaktionszeiten geführt. In einer realen Situation könnten Fahrer die über die Möglichkeit des risikominimalen Zustands informiert sind entscheiden, dass Sie sich in einer Übernahmesituation entweder nicht in der Lage fühlen die Steuerung zu übernehmen, oder aber bewusst den risikominimalen Zustand in Kauf nehmen um eine hoch involvierende Nebenaufgabe zu Ende zu bringen. Solche Szenarien waren durch die vorliegende Studie nicht abgedeckt und sollten für die Gestaltung von automatisierten Fahrfunktionen berücksichtigt werden.

Einige Studien konnten zeigen, dass das Vorhandensein unterschiedlicher Zeit-Budgets zur Übernahme der Steuerung nach einer automatisierten Fahrt die Dauer und die Qualität des Übernahmeprozesses beeinflussen kann (Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013; Zeeb et al., 2015). Es wird vermutet, dass ein geringeres Zeit-Budget zwar allgemein zu einem schnelleren Abschalten der Automation durch die Fahrer führt, hierdurch aber die Qualität der Übernahme beeinträchtigt wird. Da die Fahrer in der vorliegenden Studie nicht über das vorhandene Zeit-Budget bis zu einer Übernahme informiert wurden, ist davon auszugehen, dass sie es aus dem jeweiligen Übernahmeszenario ableiteten.

Die für diese Studie entworfenen Szenarien stellten jeweils Annäherungen an realistische Übernahmeszenarien dar und sollten sowohl sehr einfache „alltägliche“ Situationen, als auch seltene und besonders anspruchsvolle Situationen nachbilden. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Übernahmeaufforderungen in der Realität in noch komplexeren Situationen ausgegeben werden, die allerdings für den Kontext Autobahn derzeit schwer vorstellbar sind. Die Szenarien wurden auf Grundlage der vorhandenen Literatur sowie der durchgeführten Experten-Interviews entworfen. Die inzwischen in den USA veröffentlichten Berichte zu Übernahmeszenarien in realen Testfahrzeugen (DMV, 2016) korrespondieren gut mit den entworfenen Szenarien und sind ein erster Hinweis auf die hohe Relevanz solcher komplexen Fahrsituationen für die Gestaltung des Übergangs zwischen Automation und Fahrer.

Als Übernahmeaufforderung wurde ein einfaches HMI gestaltet, das an das Design von aktuell im Fahrzeug verwendeten Symbolen und Warntönen angelehnt war. Einige Studien fanden, dass die Gestaltung des HMIs die Geschwindigkeit und die Qualität der Übernahme nach einer automatisierten Fahrt beeinflussen kann (Helldin et al., 2013; Wulf et al., 2013; Lorenz et al., 2014; Petermann-Stock et al., 2015). Einige Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass durch die Gestaltung der Warnung die Zeiten bis zu einem Abschalten der Automation nicht verbessert werden können (Melcher et al., 2015), solange mindestens eine deutlich wahrnehmbare akustische und eine visuelle Warnung ausgegeben werden. Vielmehr scheinen solche Interaktionskonzepte die Qualität der Reaktionen nach einer Übernahme (Lorenz et al., 2014) und das Situationsbewusstsein in der Übernahmesituation verbessern zu können (Helldin et al., 2013).

Da in der vorliegenden Studie die Kombination aus einem deutlich wahrnehmbaren Warnton und einem Symbol im Head-Up Display verwendet wurde, kann davon ausgegangen werden, dass zusätzliche Warnmodalitäten oder eine veränderte Gestaltung der Warnsymbole keine grundsätzliche Änderung der Reaktionszeiten hervorgerufen hätte. Möglich ist jedoch, dass zusätzliche Informationen über den Grund der Übernahmeaufforderung und die Präsentation von zusätzlichen Informationen über sichere Fahrwege oder das Hinweisen auf kritische Objekte in den Situationen das Verhalten nach dem Abschalten der Automation verbessert hätten.

4.6.2. Fragebogendaten

Die Szenarien wurden von den Versuchspersonen als unterschiedlich kritisch und beanspruchend erlebt. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Manipulation der Variable *Art des Übernahmeszenarios* erfolgreich war. Die Einordnung der Szenarien auf den subjektiven Skalen deutet allerdings darauf hin, dass hinsichtlich der Kritikalität und Beanspruchung für die Fahrer auch noch schwierigere Szenarien vorstellbar gewesen wären. Auch die Kontrollierbarkeit der Szenarien scheint trotz der schwierigen Übernahmeszenarien zumindest subjektiv für die meisten Probanden gegeben gewesen zu sein.

In den subjektiven Maßen zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen. Die Art der Nebenaufgabe scheint das grundsätzliche Erleben der Situationen nicht beeinflusst zu haben. Auch im manuellen Durchfahren der Szenarien wurden die Szenarien als vergleichbar beanspruchend, kontrollierbar und kritisch bewertet. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Szenarien für die Probanden grundsätzlich zwar schwierig, aber im Vergleich zu den ihnen aus dem Alltag bekannten Fahrsituationen nicht unrealistisch komplex erschienen.

Es konnte keine Veränderung des Vertrauens in die Automation durch das Erleben der verschiedenen Übernahmeszenarien festgestellt werden. Das Vertrauen in die Fähigkeiten eines Systems wird häufig als wichtiger Einflussfaktor auf die Leistung in der Interaktion zwischen Mensch und Automation angeführt (Helldin et al., 2013; Shen und Neyens, 2014). Das mittlere Vertrauen der Versuchspersonen in die Fähigkeiten der Automation lag für die vorliegende Studie sowohl vor als auch nach dem Erleben der Übernahmeszenarien in einem mittleren bis hohen Bereich. Eine Veränderung des Vertrauens in Abhängigkeit von dem Vorhandensein einer Nebenaufgabe während der Fahrt konnte nicht ermittelt werden.

Einerseits kann dies als ein Hinweis darauf gewertet werden, dass gelegentliche Übernahmeaufforderungen mit erkennbarem Grund das Vertrauen in eine Automation nicht gefährden. Andererseits ließe sich möglicherweise ein Zuwachs des Vertrauens durch den häufigeren Gebrauch einer Automation erwarten wie er z.B. in Gold, Körber, Hohenberger, Lechner und Bengler (2015) gefunden wurde, der in dieser Studie durch das relativ häufige Auslösen von teilweise schwierigen Übernahmesituationen verhindert wurde.

4.6.3. Erste Reaktionen auf den TOR und das Event

Die Methode des Abschaltens der Automation (Hebel, Bremse, Lenken, Kombination) scheint hauptsächlich durch die Art des Übernahmeszenarios beeinflusst gewesen zu sein. Die Art der Nebenaufgabe hatte hierbei keinen eindeutigen Effekt. Dies könnte als ein Hinweis darauf gedeutet werden, dass die Probanden aufgrund eines zumindest teilweise aufgebauten Situationsbewusstseins vor dem Abschalten der Automation eine bestimmte Art des Abschaltens wählten, die ihnen für die Situation angemessen erschien. Dafür spricht vor allem die deutlich häufigere Verwendung der Bremse in dem am kritischsten bewerteten Szenario *M04*.

Die ersten Reaktionen nach dem Event sind in den automatisierten Versuchsgruppen vergleichbar und außerdem nicht deutlich unterschiedlich im Vergleich zu einer manuellen Fahrt. Grundsätzlich scheinen Fahrer also je nach wahrgenommener Situation zunächst ähnlich zu reagieren, unabhängig davon ob sie vorher automatisiert oder manuell gefahren sind. Unterschiede zeigen sich jedoch in den Reaktionszeiten sowie in dem Fahrverhalten während der Übernahmeszenarien.

4.6.4. Reaktionszeiten

Als Reaktionszeiten wurden alle Zeiten ermittelt, die von dem Moment der Übernahmeaufforderung bis zu verschiedenen, vorab definierten, Reaktionen auf diese Übernahmeaufforderung verstrichen. Diese Zeitspannen wurden zwischen den Versuchsgruppen *Überwacht*, *Lesen*, *Spiel* und *Manuell* sowie zwischen den Übernahmeszenarien *M01* bis *M05* verglichen. Für einige dieser Reaktionszeiten wurde eine Abhängigkeit von einem oder beiden Faktoren nachgewiesen.

Die Zeit bis zum Abschalten der Automation nach dem TOR scheint nicht oder nur geringfügig durch die Art des Übernahmeszenarios beeinflusst gewesen zu sein. Der größte Unterschied zeigte sich hier zwischen der Gruppe, die die Automation überwachte und den Gruppen mit den Nebenaufgaben auf dem Tablet-PC. Die überwachende Gruppe schaltete die Automation im Mittel um fast drei Sekunden schneller aus als die Gruppe die vor der Übernahmeaufforderung ein Spiel auf dem Tablet-PC spielte. Wie vor allem aus der grafischen Darstellung der Zeit bis zum Abschalten der Automation (vgl. Abbildung 23) deutlich wird, reagierten einige Personen aus der Gruppe *Lesen* etwas schneller als aus der Gruppe *Spiel*, vor allem in den ersten ca. vier Sekunden nach der Übernahmeaufforderung.

Die involvierende Aufgabe *Spiel* scheint also für einige Personen das Abschalten der Automation zusätzlich zu verzögern.

Die längste mittlere Übernahmezeit von $M = 5.46$ ($SD = 1.86$) Sekunden wurde in der Gruppe *Spiel* für das Szenario *M01* gefunden. Da in diesem Szenario nicht auf ein kritisches Event reagiert werden musste ließen sich die Probanden hier möglicherweise mehr Zeit um ihre Umgebung wahrzunehmen bevor sie die Automation abschalteten. Diese maximale mittlere Zeit bis zum Abschalten der Automation liegt in einem vergleichbaren Bereich wie z.B. die maximalen mittleren Zeiten in Damböck et al. (2012) und Naujoks et al. (2014) und entspricht weitgehend den Empfehlungen für eine maximale mittlere Übernahmezeit von 5.8 Sekunden in Petermann-Stock et al. (2015). Die gefundene Zeit liegt im Durchschnitt um 1-3 Sekunden über den Zeiten in einigen anderen Studien (z.B. Gold et al., 2013b; Petermann-Stock et al., 2013; Zeeb et al., 2015; Melcher et al., 2015).

Der Grund für diese verlängerten Reaktionszeiten scheint nicht in der Komplexität der Szenarien zu liegen, da die längsten Reaktionszeiten gerade in den weniger komplexen Szenarien gefunden wurden. Vielmehr scheint die Nebenaufgabe *Spiel* eine Art von Ablenkung während der automatisierten Fahrt dargestellt zu haben, die es für die Probanden schwierig machte sich von der Aufgabe zu lösen. Solche involvierenden und immersiven Nebenaufgaben scheinen also gut geeignet zu sein um maximale Reaktionszeiten in einer Übernahme-situation zu ermitteln. Gleichzeitig wird deutlich, dass es wichtig ist für das Testen automatisierter Fahrfunktionen Nebenaufgaben auszuwählen die als realistisch für zukünftige automatisiert fahrende Personen vermutet werden. In der Studie von Damböck et al. (2012), die vergleichbare Zeiten lieferte, war die Motivation der Versuchspersonen bei der Durchführung der Nebenaufgabe durch die Verknüpfung der Vergütung mit der Leistung in der Nebenaufgabe sichergestellt. Solche extrinsischen Anreize erzielen somit vermutlich eine ähnliche Wirkung wie die intrinsische Motivation, die in der vorliegenden Studie und z.B. bei Naujoks et al. (2014) durch interessante und involvierende Nebenaufgaben entstand.

Hinweise darauf, in welcher Phase der Übernahme der Steuerung diese Verzögerungen beim Abschalten der Automation entstehen, lassen sich aus den Zeiten bis zum ersten Blick auf die Straße und bis zu dem Zeitpunkt wo die Hände am Lenkrad/ die Füße an den Pedalen waren ableiten. Diese Reaktionen gingen in allen Versuchsbedingungen der Reaktion „Abschalten der Automation“ voran. Diese Reaktionen werden also auf jeden Fall von allen Versuchspersonen ausgeführt bevor die Automation abgeschaltet wird.

Der erste Blick auf die Straße fand in der Gruppe *Spiel* im Mittel nach $M = 1.90$ ($SD = 1.23$) Sekunden und damit am spätesten von den Versuchsgruppen statt. In dieser Hinsicht unterschieden sich sogar die Gruppen *Lesen* und *Spiel* noch einmal statistisch signifikant voneinander. Ein Teil der Personen scheint beim Spielen des Spiels auf dem Tablet-PC Schwierigkeiten gehabt zu haben den Blick von dem Tablet-PC zu lösen. Dieser „Aufmerksamkeits-Klebeffekt“ der Nebenaufgabe *Spiel* wird besonders deutlich in Abbildung 24, in der ersichtlich ist, dass ungefähr 1.5 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung zwar bereits annähernd 80% der Personen in der Gruppe *Lesen* und 100% der Personen aus der Gruppe *Überwacht*, aber erst 50% der Gruppe *Spiel* ihren Blick wieder auf die Straße gerichtet hatten. Diese 80% werden in der Gruppe *Spiel* erst nach weiteren 1.5 Sekunden erreicht. Im Vergleich zu bisherigen Studien sind damit auch für diese Reaktion leicht längere Reaktionszeiten gemessen worden (z.B. 1.1 Sekunden bei Damböck et al., 2012; 1.25 Sekunden bei Gold et al., 2013a; 0.94 Sekunden bei Gold et al., 2013b).

Dieser Verzögerung wird zwar bei der Bewegung der Hände zum Lenkrad wieder soweit ausgeglichen, dass hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen *Lesen* und *Spiel* mehr nachweisbar sind, er bleibt aber bei den nachfolgenden Reaktionen „Füße an den Pedalen“ und „Abschalten der Automation“ immer noch deskriptiv sichtbar.

Im Mittel scheinen die Hände etwas früher an das Lenkrad zu fassen als die Füße wieder an die Pedale gestellt werden. Die Hände erreichten in der Gruppe *Spiel* im Durchschnitt nach $M = 3.90$ ($SD = 1.48$) Sekunden wieder das Lenkrad, die Füße waren in dieser Gruppe nach $M = 4.41$ ($SD = 1.76$) Sekunden wieder bereit für eine Bremsreaktion. Aus den Visualisierungen (siehe Abbildung 23, Abbildung 27 und Abbildung 26) wird deutlich, dass diese Reaktionen jeweils kurz vor dem Abschalten der Automation durchgeführt wurden.

Bezogen auf die Übernahmeszenarien zeigten sich für die beiden komplexeren Übernahmesituationen *M04* und *M05* schnellere Reaktionszeiten für die Bewegung der Hände und Füße zu den Stellteilen des Fahrzeugs. Dies deutet zumindest auf ein grundlegendes Verständnis der Fahrsituation unmittelbar nach der Übernahmeaufforderung hin. Eine Einstufung dieser Situationen als kritischer im Vergleich zu den weniger komplexen Situationen scheint bereits in dem Zeitraum vor der Bewegung der Hände/Füße stattgefunden zu haben, wodurch zumindest ein Teil der Probanden diese Bewegungen schneller ausführte.

Aus der Betrachtung dieser Reaktionen, die dem Abschalten der Automation vorangehen, können Einflussfaktoren auf die Dauer bis zum Abschalten der Automation hergeleitet werden. Die Unterschiede in dieser Zeitspanne scheinen vor allem durch die Anwesenheit einer Nebenaufgabe vor der Ausgabe des TOR beeinflusst zu sein und zusätzlich durch die Art der Nebenaufgabe differenziert zu werden. Eine Nebenaufgabe auf einem Tablet-PC führt grundsätzlich zu einem späteren Abschalten der Automation, da der Tablet-PC zunächst aus der Hand gelegt wird bevor die Hände an das Lenkrad und die Füße zu den Pedalen gehen. Eine zusätzliche Verzögerung entsteht aus dem verspäteten Lösen des Blicks von besonders involvierenden Nebenaufgaben. Zusätzlich zu diesen Komponenten gibt es möglicherweise außerdem noch einen Effekt der kognitiven Beanspruchung, die bei dem Wechsel zwischen zwei einander in ihren motorischen und kognitiven Anforderungen sehr unähnlichen Aufgaben entsteht (siehe z.B. Monsell, 2003 und Wickens et al., 2013).

Als Maße für die Absicherung der Fahrumgebung nach einer Übernahmesituation und damit indirekt für das Situationsbewusstsein von Fahrern während einer solchen Situation wurden die Reaktionszeiten bis zu dem ersten Blick in den Spiegel und den ersten Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige erhoben. Aus diesen Zeiten ist ersichtlich, dass die Absicherung der Fahrsituation bei vielen Probanden in den automatisierten und nicht überwachenden Gruppen *Lesen* und *Spiel* im Vergleich zu der überwachenden Gruppe und der manuell fahrenden Gruppe deutlich verzögert stattfanden. Gerade der Vergleich mit der manuell fahrenden Gruppe ist hier interessant, um einen Eindruck von der relativen Verzögerung solcher Reaktionen nach einer automatisierten Fahrt zu erhalten.

Ein signifikanter Unterschied zeigte sich für den ersten Blick in den Spiegel zwischen der Gruppe, die das Spiel auf dem Tablet-PC gespielt hatte und der Gruppe die auch vor der Übernahmeaufforderung manuell das Fahrzeug steuerte. Die Gruppe *Spiel* schaute im Mittel erst nach $M = 7.80$ ($SD = 2.56$) Sekunden das erste Mal in den Spiegel, während die Gruppe *Manuell* diese Reaktion im Mittel bereits nach $M = 4.94$ ($SD = 3.75$) Sekunden gezeigt hatte. Die Visualisierung (Abbildung 28) des Verlaufs der Reaktionen der einzelnen

Versuchspersonen deutet darauf hin, dass zu dem Zeitpunkt der Auslösung des Events in den manuell fahrenden Gruppe bereits etwa 60% der Stichprobe die linke Fahrspur über den Blick in den Spiegel abgesichert hatte, während zu dem selben Zeitpunkt nur ca. 25% der Gruppen *Lesen* und *Spiel* eine Absicherung durchgeführt hatten.

Nach dem Auslösen des Events scheinen viele Personen in den automatisierten Gruppen mit Nebenaufgabe das Bedürfnis zu haben diese Reaktion nachzuholen. Ein mit den manuellen und überwachten Fahrern vergleichbarer Anteil an Blicken in den Seitenspiegel wird jedoch in der Gruppe *Spiel* erst nach ca. 11-12 Sekunden erreicht. Diese Reaktion, die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig ist, ist damit um bis zu 5 Sekunden verzögert im Vergleich zu der gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt.

Ein ähnliches Muster fand sich bei den Blicken auf die Geschwindigkeitsanzeige, die möglicherweise erst das Einschätzen der Passung der gefahrenen Geschwindigkeit zu der Verkehrssituation erlaubte. Auch hier lagen für die Gruppe *Spiel* wieder die höchsten mittleren Reaktionszeiten vor ($M = 10.42$, $SD = 5.56$ Sekunden), die sich signifikant sowohl von den mittleren Reaktionszeiten der Gruppe *Überwacht* ($M = 6.21$, $SD = 4.48$) als auch der Gruppe *Manuell* ($M = 6.71$, $SD = 6.07$) unterschieden. Ein vergleichbarer Anteil an gezeigten Reaktionen nach einer Übernahmeaufforderung zwischen den Versuchsgruppen wurde auch hier erst nach ca. 11-12 Sekunden erreicht.

Ähnliche Ergebnisse erzielten auch schon Lorenz et al. (2014). In Ihrer Studie stellten Sie eine niedrigere Wahrscheinlichkeit der Absicherung der Umgebung nach einer Übernahmeaufforderung mit Unterstützung durch ein HMI-Konzept zur Verbesserung des Situationsbewusstseins fest. Allerdings lag hier die maximale mittlere Zeit bis zum ersten Blick in den Seitenspiegel bei einem deutlich niedrigeren Wert von $M = 3.22$ ($SD = 0.54$) Sekunden. Auch die Studie von Gold et al. (2013b) fand für diese Messgröße niedrigere Reaktionszeiten von maximal $M = 3.36$ Sekunden.

Die längeren gemessenen Reaktionszeiten in der vorliegenden Studie sind möglicherweise durch das Einsetzen des Events nach dem TOR zu erklären. In dem Zeitraum zwischen dem TOR und dem Event lag für einige Fahrer die Notwendigkeit für eine Absicherung der linken Fahrspur noch nicht vor. Betrachtet man nur die mittleren Reaktionszeiten bis zum Blick in den Spiegel derjenigen Probanden, die diese Reaktion erst nach dem Event zeigen (bei Meter 175/5.25 Sekunden nach dem TOR), ergeben sich im Mittel vergleichbare Zeiten wie in Gold et al. (2013b) und Lorenz et al. (2014). Für die Zeit ab dem Event liegen die Reaktionszeiten bis zum Blick in den Spiegel in der vorliegenden Studie bei $M = 3.47$ ($SD = 3.24$) Sekunden für die Gruppe *Überwacht*, bei $M = 2.89$ ($SD = 2.95$) Sekunden für die Gruppe *Lesen* und bei $M = 3.68$ ($SD = 2.88$) Sekunden für die Gruppe *Spiel*. Die manuell gefahrene Gruppe war mit den automatisierten Gruppen nicht vergleichbar, da hier die Blicke in den Spiegel in über 60% der Fälle bereits vor dem Event stattgefunden hatte.

Obwohl die Ergebnisse zu den Reaktionszeiten bis zum Blick in den Spiegel durch die Betrachtung als Reaktion auf das Event anstatt als Reaktion auf den TOR vergleichbar mit den schnelleren Reaktionszeiten in anderen Studien werden, zeigt sich, dass diese Reaktion in einer manuellen Fahrt von einem deutlich höheren Anteil von Fahrern bereits zur generellen Absicherung einer Situation verwendet wird. Nach einer automatisierten Fahrt mit ablenkender Nebenaufgabe vernachlässigen Fahrer solche generellen Absicherungen und holen diese erst bei Bedarf und deutlich verzögert nach.

Ebenfalls als Reaktion auf das Event wurde die Bremsreaktion ausgewertet. Es wurde vermutet, dass eine verzögerte Reaktion auf ein kritisches Ereignis nach einer Übernahmesituation einen Indikator für ein verringertes Situationsbewusstsein in einer solchen Situation darstellt. Diese Vermutung kann auf der Grundlage der analysierten Reaktionszeiten für die Bremsreaktion nicht bestätigt werden. Die Bremsreaktionen lagen für die unterschiedlichen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien in einem Bereich von $M = 1.61$ ($SD = 0.47$) bis $M = 1.89$ ($SD = 0.85$) Sekunden nachdem das vorausfahrende Fahrzeug begonnen hatte die Geschwindigkeit zu reduzieren. Diese Reaktionsgeschwindigkeiten sind ähnlich zu den Bremsreaktionen in Gold et al. (2013b), die für einen vergleichbaren Abstand zwischen dem Ego-Fahrzeug und dem Hindernis (~5 Sekunden) eine mittlere Bremsreaktionszeit von $M = 2.06$ ($SD = 0.34$) Sekunden fanden.

Die Fahrer waren also in der vorliegenden Studie grundsätzlich in der Lage auf ein kritisches Ereignis nach einer abgelenkten automatisierten Fahrt und einer Übernahmeaufforderung vergleichbar zu reagieren wie in derselben Situation in einer manuellen Fahrt. Nicht auszuschließen ist, dass automatisierte Fahrer eine komplexere Reaktion die mehr Freiheitsgrade bei der Entscheidung zur Verfügung stellt schlechter bewältigt hätten. Die Bremsreaktionszeit auf ein kritisches Ereignis alleine scheint somit kein geeignetes Maß zu sein um manuelle Fahrer von automatisierten Fahrern nach einer Übernahmeaufforderung zu differenzieren. Es sollten in zukünftigen Studien weitere Maße gesucht werden um diese Differenzierung möglich zu machen. Hilfreiche Hinweise für solche Maße bietet ein Blick in die Fahrdaten nach der Übernahme der Steuerung.

4.6.5. Fahrdaten

Die Erhebung der Fahrdaten für die jeweiligen Versuchsgruppen und Übernahmeszenarien sollte ergänzend zu der Dauer der Übernahme Hinweise auf die Qualität des Fahrverhaltens nach der Übernahme geben.

Ebenso wie in der Geschwindigkeit der Bremsreaktion konnten in der Intensität dieser Reaktion keine eindeutigen Unterschiede zwischen den manuellen Fahrer, den die Automation überwachenden Fahrern und den Fahrern mit Nebenaufgabe nachgewiesen werden. Zwar wurde für das Baustellen-Szenario *M04* für den Bereich kurz vor dem verunfallten Fahrzeug ein höherer Bremsdruck in der manuell fahrende Gruppe im Vergleich zu der automatisiert fahrenden Gruppen gefunden. Dieser Unterschied dürfte allerdings beinahe vollständig darauf zurückzuführen sein, dass in den automatisierten Gruppen die Automation direkt nach der Ausgabe des TOR bereits eine Geschwindigkeitsreduktion durchgeführt hatte um sich der Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h kurz vor der Baustelle anzupassen.

Die manuell fahrende Gruppe war also gezwungen das Bremspedal stärker zu treten, da mittels des Bremspedals die Geschwindigkeit in der manuellen Gruppe von ca. 120 km/h auf 60 km/h reduziert werden musste. Die Bremspedalstellungen in den automatisierten Gruppen traten hingegen zusätzlich zu der bereits durch die Automation durchgeführten Bremsung auf. Sichtbar werden diese Unterschiede auch in den Geschwindigkeitsverläufen der einzelnen Versuchsgruppen pro Übernahmeszenario (Abbildung 35).

Hinsichtlich der gewählten Geschwindigkeiten nach der Ausgabe des TOR unterschieden sich vor allem die Übernahmeszenarien voneinander. Während in allen Versuchsgruppen in dem unkritischen Szenario *M01* nur eine geringe Reduktion der Geschwindigkeit von 120 km/h auf durchschnittlich ungefähr 110 km/h beobachtet werden konnte, reduzierten die

Probanden in allen Versuchsgruppen ihre Geschwindigkeit deutlich, nachdem das vorausfahrende Fahrzeug begonnen hatte zu bremsen (Szenarien *M02*, *M03* und *M05*). In Szenario *M05*, das durch einsetzenden Starkregen gleichzeitig zum TOR charakterisiert war, wählten die Probanden außerdem für den Bereich ab ca. 250 Metern nach dem TOR eine niedrigere Geschwindigkeit (~80 km/h) als in den Szenarien ohne verschlechterte Umweltbedingungen. Die Fahrer passten hier also scheinbar ihr Verhalten den schlechteren Sicht- und Straßenbedingungen an.

In dem Baustellen-Szenario *M04* wurde die Geschwindigkeit in den automatisierten Gruppen ab der Ausgabe des TOR bereits automatisch stetig von 120 km/h zu 60 km/h reduziert. Eine Analyse der Geschwindigkeitsverläufe ergab jedoch für die automatisierten Fahrer zusätzlich noch eine weitere Reduzierung der Geschwindigkeit in dem Bereich 100 Meter vor dem verunfallten Fahrzeug, die von den manuell fahrenden Fahrern nicht gezeigt wurde. Diese niedrigeren Geschwindigkeiten wurden auch in dem Bereich von 100 Metern hinter dem verunfallten Fahrzeug von den automatisierten Fahrern weiter beibehalten. In diesem speziellen Szenario waren die manuell fahrenden Probanden also entweder besser in der Lage die Spur zu wechseln, wodurch eine Reduktion der Geschwindigkeit nicht in dem gleichen Maße wie in den automatisierten Gruppen notwendig war, oder die manuellen Fahrer unterschätzten das Risikopotenzial der Situation und wählten unangemessen hohe Geschwindigkeiten.

Dafür, dass manuell fahrende Versuchsteilnehmer in dem Baustellen-Szenario *M04* eine zu hohe Geschwindigkeit wählten, sprechen die vergleichsweise hohen maximalen Querbewegungen für die manuelle Gruppe in diesem Szenario sowohl vor dem verunfallten Fahrzeug als auch in dem Bereich hinter dem verunfallten Fahrzeug (siehe Abbildung 39 und Abbildung 37). Dieses Maß könnte darauf hinweisen, dass einige Fahrer die unzureichende Reduzierung der Geschwindigkeit in dieser Situation durch Ausweichmanöver auf die linke Fahrspur ausgleichen mussten. Gegen diese Möglichkeit spricht hingegen, dass die Anzahl der kritischen Ereignisse in dieser Situation für die manuelle Fahrergruppe mit den kritischen Ereignissen der automatisierten Gruppen vergleichbar waren. Es entstanden also aus den höheren maximalen Querbewegungen und Geschwindigkeiten anscheinend nicht mehr kritische Situationen, die zu Kollisionen, dem Anhalten des Fahrzeugs oder starken Bremsungen führten (siehe Abbildung 38).

Weitere untersuchte Fahrdaten beinhalteten die maximalen negativen Längsbewegungen, die minimalen Abstände zum Vorderfahrzeug und die Anzahl der Eingriffe der Automation in die Steuerung. Die maximalen negativen Längsbewegungen vervollständigen das Bild hinsichtlich des Brems- und Geschwindigkeitswahlverhaltens der Versuchsteilnehmer in der manuell fahrenden Gruppe. Für diese Gruppe wurden unabhängig von dem Übernahmeszenario weniger starke negative Längsbewegungen im Vergleich zu der automatisiert fahrenden Gruppe *Überwacht* gemessen, was auf ein geringeres oder weniger abruptes Reduzieren der Geschwindigkeiten in den Situationen hindeutet.

In den minimalen Abständen zum Vorderfahrzeug konnten keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen gefunden werden. Hier scheinen die automatisierten Fahrer nach der Übernahmeaufforderung mit den manuellen Fahrern vergleichbare Leistungen gezeigt zu haben. Möglich ist hier noch, dass die Szenarien sich nicht so kritisch entwickelten (z.B. durch von einer anderen Fahrspur einscherende Fahrzeuge), dass sich Unterschiede zeigen konnten.

Für solche sich kritisch entwickelnde Szenarien wird jedoch auf Grundlage dieser Studie dringend empfohlen entsprechende Assistenzsysteme auch nach der Übernahme der Steuerung durch den Fahrer bereit zu halten. Hinweise auf eine Notwendigkeit solcher Systeme bietet die Anzahl der Eingriffe, die von der Automation in dieser Studie durchgeführt werden musste. In dem Baustellen Szenario *M04* sorgte die Fähigkeit des Systems auch nach der Übernahmeaufforderung weiter die Geschwindigkeit zu regeln dafür, dass die Probanden zum Zeitpunkt des Abschaltens der Automation bereits eine Geschwindigkeit erreicht hatten, die es ihnen in den meisten Fällen ermöglichte die Situation ohne eine Kollision handzuhaben. Auch die manuell fahrende Gruppe hätte von dieser automatischen Geschwindigkeitsanpassung profitieren können. Auch in den Szenarien *M02*, *M03* und *M05* griff die Automation relativ häufig (in bis zu 36% der Fahrten) regulierend in die Längsführung ein, wenn die Automation bei dem Unterschreiten eines Mindestabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug noch nicht abgeschaltet worden war. Diese Eingriffe waren besonders häufig in den automatisierten Fahrten mit Nebenaufgabe notwendig und dauerten hier im Mittel bis zu $M = 1.63$ ($SD = 1.73$) Sekunden, was die Notwendigkeit einer solchen Funktionalität von automatisierten Fahrfunktionen unterstreicht.

Auch wenn in der vorliegenden Studie somit keine eindeutigen Hinweise auf eine Verschlechterung der Qualität der Fahrleistung nach einer Übernahme aus einer abgelenkten automatisierten Fahrt im Vergleich zu einer manuellen Fahrt gefunden wurden, wird aus den Ergebnissen jedoch deutlich, dass die Fahrer in solchen Bedingungen unbedingt durch ein intelligentes Verhalten der Automation sowohl in dem Bereich zwischen der Übernahmeaufforderung und der Übernahme der Steuerung durch den Fahrer, als auch in dem Bereich nach der Übernahme der Steuerung unterstützt werden müssen. Nur so kann neben einem Komfortgewinn auch zumindest ein mit einer manuellen Fahrt vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht werden.

Neben aktuell bereits in der Forschung befindlichen Systemen zur Unterstützung der Fahrer bei der Überwachung der Automation (z.B. Helldin et al., 2013) und zur Verbesserung der Entscheidungen der Fahrer nach der Übernahme der Automation (z.B. Lorenz et al., 2014), sollten auch spezielle Assistenzsysteme entwickelt werden, die den Fahrer nach dem Abschalten der Automation weiter absichern. So könnten sehr spät reagierenden Fahrer trotzdem noch eine sichere Möglichkeit zur Übernahme der Steuerung gegeben und Fehlentscheidungen der Fahrer nach dem Abschalten der Automation abgefangen werden. Erste Ansätze in diese Richtung bieten Publikationen, die durch die Anpassung der Geschwindigkeit nach einer Übernahmeaufforderung die Situation für den Fahrer entschärfen und dadurch mehr Zeit für den Aufbau eines Situationsbewusstseins in der Übernahmesituation bieten (z.B. Zeeb et al., 2015; Bahram, Aeberhard und Wollherr, 2015).

5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Automatisiertes Fahren wird wahrscheinlich in den nächsten Jahren Realität werden. Losgelöst von den technischen Schwierigkeiten auf dem Weg zu dieser Realität müssen schon jetzt Herausforderungen und mögliche Probleme bei der Nutzung solcher automatisierten Fahrfunktionen abgeschätzt werden. Hierbei kann zwar teilweise auf Konzepte und Erfahrungen aus anderen Bereichen, in denen Automatisierung bereits weiter fortgeschritten ist zurückgegriffen werden (z.B. Flugzeug- und Anlagenführung), allerdings ergeben sich aus dem speziellen Kontext und dem Fahrer als speziellem Nutzer besondere Anforderungen, die über die aus anderen Bereichen bekannten hinausgehen.

In diesem Bericht sollten einige Aspekte dieser Anforderungen untersucht und ein Beitrag zur Spezifizierung von zukünftigen Systemen geleistet werden. Hierzu wurden zunächst grundlegende Konzepte der Automationspsychologie dargestellt und auf den Fahrer als Nutzer von Automation bezogen. Es wurde deutlich, dass die Leistung des Gesamtsystems Mensch-Automation auch im Fahrzeug von der Gestaltung der Automation und den Fähigkeiten des Menschen in der Interaktion mit dieser Automation abhängt. Als besonders wichtige Konzepte für diese Interaktion wurden das Situationsbewusstsein, das Wissen über die Automation und das Vertrauen in die Automation bewertet. All diese Bereiche sollten für einen angemessenen Umgang des Menschen mit der Automation unterstützt und den tatsächlichen Fähigkeiten der Automation angepasst werden.

Als ein besonders kritischer Zeitraum wurde der Moment der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Phase des automatisierten Fahrens identifiziert. Im Rahmen einer Fahrsimulations-Studie sollte untersucht werden wie dieser Übergang der Kontrolle von der Automation zum Menschen in einem Fahrzeug abläuft. Ein Fokus lag hierbei auf der Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung des Fahrzeugs durch den Fahrer im Falle einer Übernahmeaufforderung bei dem Erreichen von Systemgrenzen.

Es wurden mehrere realistische Szenarien entworfen und im Fahrsimulator umgesetzt, die eine solche Übernahmeaufforderung in zukünftigen Fahrzeugen auslösen würden. Der Ablauf der Übernahme sowie die Fahrleistung nach der Übernahme wurde in Abhängigkeit von diesen verschiedenen Übernahmeszenarien und in Abhängigkeit von verschiedenen stark ablenkenden Nebenaufgaben während der automatisierten Fahrt analysiert. Die erhobenen Zeiten und Fahrdaten wurden verglichen mit vergleichbaren manuellen Fahrern ohne Automation, sowie mit Fahrern die die Automation während der gesamten Dauer der Fahrt überwachten.

Nach einer hochautomatisierten Fahrt von ca. 5 Minuten, während der die Fahrer entweder durch ein motivierendes Spiel auf einem in den Händen gehaltenen Tablet-PC stark abgelenkt waren, Zeitschriftenartikel auf einem Tablet-PC gelesen hatten, oder die Automation überwachten, wurde jeweils eine Übernahmeaufforderung ausgelöst. Um vergleichbare Versuchsbedingungen zu erhalten wurde in der manuell fahrenden Gruppe an der Stelle der Übernahmeaufforderung ein Warnton ausgegeben.

Es zeigte sich, dass 90% der Fahrer nach einer Fahrt mit hoher Ablenkung nach 3-4 Sekunden das erste Mal den Blick wieder auf die Straße gerichtet hatten, nach 6-7 Sekunden die Hände wieder am Lenkrad und die Füße wieder an den Pedalen hatten und nach 7-8 Sekunden die Automation abschalteten. Untersucht man allerdings als Indikatoren des Situationsbewusstseins für die Fahrsituation den ersten Blick in den Spiegel und den Blick auf die Geschwindigkeitsanzeige, werden 12-15 Sekunden benötigt. Diese Reaktionen,

die zum Verständnis der aktuellen Verkehrssituation notwendig sind, sind damit um bis zu 5 Sekunden verzögert im Vergleich zu der gleichen Situation bei einer manuellen Fahrt.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrern waren bei all diesen Reaktionen sehr hoch. Einige Fahrer zeigten deutlich schnellere Reaktionen. Allerdings gab es auch einzelne Fahrer, die für ihre Reaktionen mehr als die oben genannten Zeiten benötigten. Bei einzelnen Fahrern traten nach der Übernahme von der Automation Kollisionen oder kritische Fahrsituationen auf, was allerdings auch in der rein manuellen Fahrt in ähnlichem Umfang der Fall war. Diese Situationen hätten durch entsprechende Assistenzfunktionen (z.B. Notbremsassistent) verhindert werden können, so dass auch nach der Übergabe an den Fahrer Assistenzfunktionen vorhanden sein sollten, die den Fahrer unterstützen und Fehlbedienungen verhindern.

Die Bremsreaktionen auf ein kritisches Ereignis unmittelbar nach der Übernahmeaufforderung waren im Vergleich zu der manuell fahrenden Versuchsgruppe in den Automations-Gruppen nicht verzögert. Auch waren die gefahrenen Abstände zu den Vorderfahrzeugen in den Automations-Gruppen nicht geringer als in der manuellen Gruppe. Die etwas geringeren Geschwindigkeiten nach der Übernahmeaufforderung bei stark abgelenkten Personen weisen auf ein eher vorsichtiges Fahrverhalten nach der Übernahme hin.

Die Art der Übernahmesituation selbst scheint auf die Reaktionen nur einen geringen Einfluss zu haben. Dagegen führte ein stärkeres positives Engagement in der Nebenaufgabe mit einer schlechteren Unterbrechbarkeit zu leichten Verzögerungen vor allem bei den ersten Schritten der Übernahme.

Die verwendete Automation war in der Lage, auch nach der Ausgabe der Übernahmeaufforderung das Fahrzeug so lange sicher zu steuern, bis der Fahrer das Fahrzeug übernommen hatte. Hierzu gehörte das korrekte Halten der Spur, die korrekte Wahl der Geschwindigkeit, das Einhalten eines Mindestabstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen und wenn nötig, auch ein Anhalten vor einem Hindernis. Hatte der Fahrer nach 10 Sekunden nicht übernommen, dann hielt die Automation das Fahrzeug an („risikominimaler Zustand“). Dass dies in einigen Fällen notwendig war, zeigt, dass 10 Sekunden für einige Fahrer für eine sichere Übernahme nicht ausreichen und ist ein weiterer Hinweis auf die Notwendigkeit von unterstützenden Assistenzsystemen auch nach der Übernahmeaufforderung.

Die den Einschätzungen zugrunde liegende Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator mit Probanden im Alter von 20 bis 76 Jahren ($M = 36.0$, $SD = 15.2$) Jahren durchgeführt. Die Reaktionen unterscheiden sich möglicherweise in einem realen Fahrzeug und bei deutlich älteren/jüngeren Populationen von den hier berichteten. Die Dauer der automatisierten Fahrt war zudem mit 5 Minuten im Vergleich zu den aktuell anvisierten Use-Cases relativ kurz. Längere Übernahme- und Reaktionszeiten als Folge längerer automatisierter Fahrten, aufgrund von Müdigkeit der Fahrer, oder noch stärker involvierenden Nebentätigkeiten während der automatisierten Fahrt sind daher nicht auszuschließen.

Fahrer sind nach einer hinreichend langen Vorwarnzeit grundsätzlich in der Lage, Fahrsituationen nach einer Übernahmeaufforderung vergleichbar gut zu bewältigen wie manuell fahrende Personen. Eine hinreichende Vorwarnzeit für den überwiegenden Teil der Fahrer liegt nach einer stark beanspruchenden, motivierenden und motorisch

herausfordernden Nebenaufgabe auf einem externen Gerät bei 12-15 Sekunden. Fahrer schalteten zwar selbst die Automation deutlich schneller (nach 7-8 Sekunden) aus und konnten auch ähnlich gut auf kritische Situationen reagieren wie bei einer manuellen Fahrt, für ein umfassendes Verständnis der Verkehrssituation wird aber zusätzliche Zeit (5-7 Sekunden) benötigt. Ein Teil dieses Zeitraums könnte eingespart werden, wenn Fahrer in einer Übernahmesituation kein externes Gerät (z.B. Smartphone, Tablet) aus den Händen legen müssten.

Soll aus der Einführung von Automation im Fahrzeug nicht nur ein Gewinn an Komfort, sondern auch ein Gewinn an Sicherheit im Vergleich zum manuellen Fahren entstehen, so muss der Fahrer in Übernahmesituationen nicht nur durch eine ausreichende Vorwarnzeit unterstützt werden. Vielmehr sollte der Fahrer gerade in der Situation nach der Übernahme durch Sicherheitsfunktionen wie eine Notbremsassistentz, eine Spurverlassenswarnung, eine Spurwechselwarnung und eventuell sogar durch speziell für diese Situationen ausgelegte Fahrerassistenzsysteme unterstützt werden.

Die folgenden Punkte fassen die Voraussetzungen für eine sichere Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt zusammen:

- Der Fahrer wird so früh wie möglich und so eindeutig wie möglich von der Notwendigkeit zur Übernahme der Steuerung in Kenntnis gesetzt.
- Sollen mindestens 90 Prozent der Fahrer richtig reagieren können, muss die Übergabezeit mehr als acht Sekunden betragen. In dieser Zeit legt ein Fahrzeug bei einer Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h etwa 267 m zurück.
- Die Automation muss während des Übernahmeprozesses so lange aktiv bleiben, bis der Fahrer eindeutig die Bereitschaft zur Übernahme der Steuerung signalisiert hat.
- Bleibt die Übernahme aus, muss die Automation in der Lage sein, einen risikominimalen Zustand herbeizuführen, der für die vorliegende Situation angemessen ist.
- Das Fahrzeug erkennt 100 Prozent aller Situationen, die zu einer Übergabe der Steuerung an den Fahrer führen, ausreichend früh, um die Übernahmezeit zu gewährleisten.

Eine sichere und komfortable Übernahme der manuellen Steuerung nach einer hochautomatisierten Fahrt durch den Fahrer könnte durch bestimmte Maßnahmen erleichtert werden:

- Die Automation sollte umfassend, aber sparsam, über die vorliegende Situation informieren, um den Aufbau eines Situationsbewusstseins nach einer automatisierten Fahrt zu vereinfachen.
- Eine erhöhte Assistenzbereitschaft des Fahrzeugs nach der Übernahme der Steuerung durch den Fahrer könnte dazu beitragen, unangebrachte Reaktionen durch den Fahrer zu vermeiden (z.B. Verhindern von unnötigen Vollbremsungen oder Ausweichmanövern).
- Eine Warnkaskade unter Verwendung verschiedener Warnmodalitäten kann dem Fahrer die Dringlichkeit der Situation vermitteln und die Wahrnehmbarkeit der Warnung gewährleisten.
- Fahrer könnten gezielt für die Fähigkeiten und Grenzen einer automatisierten Fahrfunktion geschult werden, sodass angemessene Reaktionen im Falle einer Übernahme sichergestellt sind und ein zu frühes Ausschalten der Automation verhindert wird.

6. Literatur

Abbink, D. A., Mulder, M., & Boer, E. R. (2012). Haptic shared control: smoothly shifting control authority?. *Cognition, Technology & Work*, 14(1), 19-28.

Aeberhard, M., Rauch, S., Bahram, M., Tanzmeister, G., Thomas, J., Pilat, Y., ... & Kaempchen, N. (2015). Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 7(1), 42-57.

Bagheri, N., & Jamieson, G. (2004, October). The impact of context-related reliability on automation failure detection and scanning behaviour. In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 212-217). IEEE.

Bahner, J. E. (2008). Übersteigertes Vertrauen in Automation: Der Einfluss von Fehlererfahrungen auf Complacency und Automation Bias (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek Berlin).

Bahner, J. E., Hüper, A. D., & Manzey, D. (2008). Misuse of automated decision aids: Complacency, automation bias and the impact of training experience. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(9), 688-699.

Bahram, M., Aeberhard, M., & Wollherr, D. (2015, June). Please take over! An analysis and strategy for a driver take over request during autonomous driving. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015 IEEE* (pp. 913-919). IEEE.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.

Balfe, N., Sharples, S., & Wilson, J. R. (2015). Impact of automation: Measurement of performance, workload and behaviour in a complex control environment. *Applied ergonomics*, 47, 52-64.

Barger, L. K., Ayas, N. T., Cade, B. E., Cronin, J. W., Rosner, B., Speizer, F. E., & Czeisler, C. A. (2006). Impact of extended-duration shifts on medical errors, adverse events, and attentional failures. *PLoS Med*, 3(12), e487.

Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J.F., Othersen, I., & Petermann-Stock, I. (in press). *What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation*. 7. Tagung Fahrerassistenz, München, 25.-26.11.2015.

Beller, J., Heesen, M., & Vollrath, M. (2013). Improving the Driver–Automation Interaction An Approach Using Automation Uncertainty. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 55(6), 1130-1141.

Billings, C. E., Lauber, J. K., Funkhouser, H., Lyman, G. & Huff, E. M. (1976). *NASA aviation safety reporting system* (Tech. Memo. No. TM-X-3445). Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.

Brandenburg, S., & Skottke, E. M. (2014). Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving?. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on* (pp. 2978-2983). IEEE.

Damböck, D. (2013). *Automationseffekte im Fahrzeug–von der Reaktion zur Übernahme* (Doctoral dissertation, München, Technische Universität München, Diss., 2013.)

Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. *Tagung Fahrerassistenz. München, 15, 16.*

De Visser, E., Shaw, T., Mohamed-Ameen, A., & Parasuraman, R. (2010, September). Modeling human-automation team performance in networked systems: Individual differences in working memory count. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 54, No. 14, pp. 1087-1091). SAGE Publications.

De Waard, D., van der Hulst, M., Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation human factors, 1*(1), 67-82.

De Winter, J. C., Happee, R., Martens, M. H., & Stanton, N. A. (2014). Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 27*, 196-217.

Degani, A., Shafto, M., & Kirlik, A. (1999). Modes in human-machine systems: Constructs, representation, and classification. *The International Journal of Aviation Psychology, 9*(2), 125-138.

Di Nocera, F., Lorenz, B., & Parasuraman, R. (2005). Consequences of shifting from one level of automation to another: main effects and their stability. *Human factors in design, safety, and management, 363-376.*

Dinges, D. F. (1995). An overview of sleepiness and accidents. *Journal of sleep research, 4*(s2), 4-14.

Dixon, S. R., & Wickens, C. D. (2006). Automation reliability in unmanned aerial vehicle control: A reliance-compliance model of automation dependence in high workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 48*(3), 474-486.

Department of Motor Vehicles (2016). *Autonomous Vehicle Disengagement Reports*. https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/disengagement_report [Abgerufen am 05.04.2016].

Dogan, E., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A., & Jonville, P. (2014). Evaluating the shift of control between driver and vehicle at high automation at low speed: The role of anticipation. In *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*.

Donges, E. (2009). Fahrerhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (pp. 15-23). Wiesbaden: Vieweg+ Teubner.

Donmez, B., Pina, P. E., & Cummings, M. L. (2009). Evaluation criteria for human-automation performance metrics. In *Performance Evaluation and Benchmarking of Intelligent Systems* (pp. 21-40). Springer US.

Eckstein, L. & Zlocki, A. (2014). Automated Driving – Concept and Evaluation. 23. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*: Aachen.

Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 32, No. 2, pp. 97-101). SAGE Publications.

Endsley, M. R. (1996). Automation and situation awareness. *Automation and human performance: Theory and applications*, 163-181.

Endsley, M. R. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.

Endsley, M. R., Bolté, B., & Jones, D. G. (2003). SA demons: The enemies of situation awareness. *Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design*, Taylor & Francis, London, 31-42.

Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(2), 381-394.

Ergoneers (2011). Dikablis – The Eye Tracking System. User Manual Dikablis Software.

Flemisch, F., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T. & Schutte, P. C. (2003). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (No. NASA/TM-2003-212672). Hampton: NASA, Langley Research Center.

Flemisch, F., Schieben, A., Schoemig, N., Strauss, M., Lueke, S., & Heyden, A. (2011). Design of human computer interfaces for highly automated vehicles in the EU-Project HAVEit. In *Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity* (pp. 270-279). Springer Berlin Heidelberg.

Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., ... & Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik*, (83).

Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 1938-1942). SAGE Publications.

Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2015). Trust in automation—Before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle. *Procedia Manufacturing*, 3, 3025-3032.

Gold, C., Lorenz, L., Damböck, D., & Bengler, K. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. 6. *Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*.

Grier, R. A., Warm, J. S., Dember, W. N., Matthews, G., Galinsky, T. L., Szalma, J. L., & Parasuraman, R. (2003). The vigilance decrement reflects limitations in effortful attention, not

mindlessness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(3), 349-359.

Hancock, P. A. (2015, March). Automobility: the coming use of fully-automated on-road vehicles. In *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*, 2015 IEEE International Inter-Disciplinary Conference on (pp. 137-139). IEEE.

Hauß, Y. & Timpe, K.-P. (2000). Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System. In K.-P. Timpe, T. Jürgensohn & H. Kohlrep (Hrsg.), *Mensch-Maschine-Systemtechnik. Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. (41-62). Düsseldorf: Symposion.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.

Helldin, T., Falkman, G., Riveiro, M., & Davidsson, S. (2013). Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 210-217). ACM.

Hillel, A. B., Lerner, R., Levi, D., & Raz, G. (2014). Recent progress in road and lane detection: a survey. *Machine Vision and Applications*, 25(3), 727-745.

Hoffmann, J. & Gayko, J. (2009). Fahrerwarnelemente. In H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. (pp. 343-354). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Consalus, K. P. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12(2), 67.

ISO/TS 14198 (2012). Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems – Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems: ISO International Organization for Standardization.

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.

Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International journal of human-computer studies*, 66(9), 641-661.

Kaber, D. B., Perry, C. M., Segall, N., McClernon, C. K., & Prinzl, L. J. (2006). Situation awareness implications of adaptive automation for information processing in an air traffic control-related task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(5), 447-462.

Kaber, D. B., Riley, J. M., & Tan, K. W. (2002). Improved usability of aviation automation through direct manipulation and graphical user interface design. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(2), 153-178.

Kircher, K., Larsson, A., & Hultgreen, J. A. (2014). Tactical driving behavior with different levels of automation. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 15(1), 158-167.

Körber, M., & Bengler, K. (2014, September). Potential Individual Differences Regarding Automation Effects in Automated Driving. In *Proceedings of the XV International Conference on Human Computer Interaction* (p. 22). ACM.

Körber, M., Weißgerber, T., Kalb, L., Blaschke, C., & Farid, M. (2015). Prediction of Take-Over Time in Highly Automated Driving by Two Psychometric Tests. *Dyna*, 82(193), 195-201.

Kraftfahrt-Bundesamt (2015). *Bestand an allgemeinen Fahrerlaubnissen im Zentralen Fahrerlaubnisregister am 1. Januar 2015 nach Geschlecht, Lebensalter und Fahrerlaubnisklassen*.

http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Kraftfahrer/FE/2015/fe4_2015.pdf [Abgerufen am 24.02.2016].

Krueger, H. P., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB - A task-oriented driving simulation. In *Proceedings of the driving simulator conference (DSC). Orlando* (pp. 232-331).

Lange, C. (2005). The development and usage of Dikablis (Digital wireless gaze tracking system). *Abstracts of the 13th European Conference on Eye Movements ECEM13, Bern* (2005), p. 50

Lee, K. J., Joo, Y. K., & Nass, C. (2014, April). Partially intelligent automobiles and driving experience at the moment of system transition. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 3631-3634). ACM.

Lee, J. D., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35(10), 1243-1270.

Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1), 50-80.

Jian, J. Y., Bisantz, A. M., & Drury, C. G. (2000). Foundations for an empirically determined scale of trust in automated systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 4(1), 53-71.

Lim, J., & Dinges, D. F. (2010). A meta-analysis of the impact of short-term sleep deprivation on cognitive variables. *Psychological bulletin*, 136(3), 375.

Lo, J. C., Groeger, J. A., Santhi, N., Arbon, E. L., Lazar, A. S., Hasan, S., ... & Dijk, D. J. (2012). Effects of partial and acute total sleep deprivation on performance across cognitive domains, individuals and circadian phase. *PLoS ONE* 7(9): e45987. doi:10.1371/journal.pone.0045987.

Löper, C., Kelsch, J., & Flemisch, F. (2008). Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, S, 215-237.

Louw, T., Merat, N. & Jamson, H. (2015). Engaging with Automation: To be or not to be in the loop? *Proceedings of the 8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.

Lorenz, L., Kerschbaum, P., & Schumann, J. (2014). Designing take over scenarios for automated driving How does augmented reality support the driver to get back into the loop?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 1681-1685). SAGE Publications.

Luczak, H. (1975). Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen. *Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften: Reihe 10 (2), Angewandte Informatik, elektronische Datenverarbeitung*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Manzey, D., Reichenbach, J., & Onnasch, L. (2008, September). Performance consequences of automated aids in supervisory control: The impact of function allocation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, No. 4, pp. 297-301). SAGE Publications.

Marinik, A., Bishop, R., Fitchett, V., Morgan, J. F., Trimble, T. E., & Blanco, M. (2014). *Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Concepts of Operation* (No. DOT HS 812 044).

Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., & Winner, H. (Eds.). (2015). *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer-Verlag.

McBride, S. E., Rogers, W. A., & Fisk, A. D. (2010, September). Do Younger and Older Adults Differentially Depend on an Automated System?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 54, No. 2, pp. 175-179). Sage Publications.

McBride, S. E., Rogers, W. A., & Fisk, A. D. (2011). Understanding the effect of workload on automation use for younger and older adults. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(6), 672-686.

Meiran, N., Chorev, Z., & Sapir, A. (2000). Component processes in task switching. *Cognitive psychology*, 41(3), 211-253.

Melcher, V., Rauh, S., Diederichs, F., Widroither, H., & Bauer, W. (2015). Take-over requests for automated driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2867-2873.

Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). How do drivers behave in a highly automated car. In *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 514-521).

Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C., & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 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.

Metzger, U., & Parasuraman, R. (2005). Automation in future air traffic management: Effects of decision aid reliability on controller performance and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 47(1), 35-49.

Molloy, R., & Parasuraman, R. (1996). Monitoring an automated system for a single failure: Vigilance and task complexity effects. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38(2), 311-322.

Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in cognitive sciences*, 7(3), 134-140.

Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Adaptive automation, trust, and self-confidence in fault management of time-critical tasks. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(1), 44.

Mosier, K. L., Skitka, L. J., Burdick, M. D., & Heers, S. T. (1996). Automation bias, accountability, and verification behaviors. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 40, No. 4, pp. 204-208). SAGE Publications.

Mosier, K. L., Skitka, L. J., Heers, S., & Burdick, M. (1998). Automation bias: Decision making and performance in high-tech cockpits. *The International journal of aviation psychology*, 8(1), 47-63.

Mosquet, X., Dauner, T., Lang, N., Rößmann, M., Mei-Pochtler, A., Agrawal, R. & Schmiege, F. (2015). *Revolution in the Driver's Seat: The Road to Autonomous Vehicles*. <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/automotive-consumer-insight-revolution-drivers-seat-road-autonomous-vehicles/> [Abgerufen am 24.02.2016].

Muhrer, E., Reinprecht, K., & Vollrath, M. (2012). Driving with a partially autonomous forward collision warning system how do drivers react?. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 698-708.

Mullen, N., Charlton, J., Devlin, A. & Bedard, M. (2011). Simulator Validity: Behaviors Observed on the Simulator and on the Road. In Fisher, D. L. (2011). *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology* (pp. 13-1 - 13-18). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Meyer, G., & Beiker, S. [Hrsg.] (2014). *Road Vehicle Automation*. Springer.

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. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318.

NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf [Abgerufen am 11.05.2015].

Onnasch, L., Wickens, C. D., Li, H., & Manzey, D. (2014). Human performance consequences of stages and levels of automation: an integrated meta-analysis. *Human factors*, 56(3), 476.

Parasuraman, R., & Davies, D. R. (1977). A taxonomic analysis of vigilance performance. In *Vigilance* (pp. 559-574). Springer US.

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 52(3), 381-410.

Parasuraman, R., Cosenzo, K. A., & De Visser, E. (2009). Adaptive automation for human supervision of multiple uninhabited vehicles: Effects on change detection, situation awareness, and mental workload. *Military Psychology*, 21(2), 270.

Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(1), 1-23.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230-253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30(3), 286-297.

Parasuraman, R., Warm, J. S., & Dember, W. N. (1987). Vigilance: Taxonomy and utility. In *Ergonomics and human factors* (pp. 11-32). Springer New York.

Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., & Mergl, C. (2013). Wie lange braucht der Fahrer--eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*.

Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., Josten, J., & Eckstein, L. (2015). „Bitte übernehmen Sie das Fahren!“: ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien. *Beiträge zum 16. Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET) Februar 2015* (pp. 346-369). Braunschweig: IST Niedersachsen e.V.

Prinzel III, L. J., Freeman, F. G., & Prinzel, H. D. (2005). Individual Differences in Complacency and Monitoring for Automation Failures. *Individual Differences Research*.

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. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 2063-2067). SAGE Publications.

Rauch, N., Kaussner, A., Krüger, H. P., Boverie, S., & Flemisch, F. (2009, September). The importance of driver state assessment within highly automated vehicles. In *16th ITS World Congress, Stockholm, Sweden* (Vol. 21, p. 25).

Rasmussen J. (1986) *Information processing and human-machine interaction*, Amsterdam: Elsevier North Holland.

Reichenbach, J., Onnasch, L., & Manzey, D. (2011). Human performance consequences of automated decision aids in states of sleep loss. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(6), 717-728.

Rein, J. R., Masalonis, A. J., Messina, J., & Willems, B. (2013, September). Meta-analysis of the Effect of Imperfect Alert Automation on System Performance. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 280-284). SAGE Publications.

Rose, C. L., Murphy, L. B., Byard, L., & Nikzad, K. (2002). The role of the Big Five personality factors in vigilance performance and workload. *European Journal of personality*, 16(3), 185-200.

Rovira, E., & Parasuraman, R. (2010). Transitioning to future air traffic management: Effects of imperfect automation on controller attention and performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 52(3), 411-425.

SAE, Society of Automotive Engineers (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. *Surface Vehicle Information Report J3016*, 1-12. http://standards.sae.org/j3016_201401/ [Abgerufen am 11.05.2015].

Saffarian, M., De Winter, J. C. F., & Happee, R. (2012, September). Automated driving: human-factors issues and design solutions. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 56, No. 1, pp. 2296-2300). Sage Publications.

Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1994). Pilot interaction with cockpit automation II: An experimental study of pilots' model and awareness of the flight management system. *The International Journal of Aviation Psychology*, 4(1), 1-28.

Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. *Handbook of human factors and ergonomics*, 2, 1926-1943.

Scerbo, M. (2006). Adaptive automation. *Neuroergonomics: The brain at work*, 239-252.

Seppelt, B. D., & Lee, J. D. (2007). Making adaptive cruise control (ACC) limits visible. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(3), 192-205.

Schieben, A., Griesche, S., Hesse, T., Fricke, N., & Baumann, M. (2014). Evaluation of three different interaction designs for an automatic steering intervention. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 27, 238-251.

Schrivver, A. T., Morrow, D. G., Wickens, C. D., & Talleur, D. A. (2008). Expertise differences in attentional strategies related to pilot decision making. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(6), 864-878.

Shen, S., & Neyens, D. M. (2014). Assessing drivers' performance when automated driver support systems fail with different levels of automation. In *Proceedings of the Human Factors*

and *Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 2068-2072). SAGE Publications.

Sheridan, T. (1987). Supervisory control. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors* (pp. 1244–1268). New York: Wiley.

Sheridan, T. B., & Nadler, E. D. (2006). A review of human-automation interaction failures and lessons learned (DOT-VNTSC-NASA-06-01). *Volpe National Transportation System Center, Cambridge, MA*.

Sheridan, T.B., and Parasuraman, R. (2006). Human-automation interaction. In *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, ed. R. Nickerson. Santa Monica: Human Factors and Ergonomics Society.

Sheridan, T. B., & Verplanck, W. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*. Man-Machine Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Mass., Tech. Report.

Siebert, F., Ruth, C., Mahlfeld, W., Oehl, M., Pfister, H. R., & Hoeger, R. (2012, January). Development of a questionnaire assessing discomfort: The disco-scale. In *International Journal of Psychology* (Vol. 47, pp. 343-344).

Singh, I. L., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1993). Automation-induced "complacency": Development of the complacency-potential rating scale. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), 111-122.

Singh, I. L., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1997). Automation-induced monitoring inefficiency: role of display location. *International Journal of Human-Computer Studies*, 46(1), 17-30.

Skitka, L. J., Mosier, K., & Burdick, M. D. (2000). Accountability and automation bias. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(4), 701-717.

Stanton, N. A., & Young, M. S. (1998). Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics*, 41(7), 1014-1028.

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.

Szalma, J. L., & Taylor, G. S. (2011). Individual differences in response to automation: the five factor model of personality. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 17(2), 71.

Toffetti, A., Wilschut, E. S., Martens, M. H., Schieben, A., Rambaldini, A., Merat, N., & Flemisch, F. (2009). CityMobil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2110(1), 1-8.

Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M. (2014). Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts (No. DOT HS 812 043).

Varotto, S. F., Hoogendoorn, R. G., Van Arem, B., & Hoogendoorn, S. P. (2015, January). Empirical longitudinal driving behaviour in case of authority transitions between adaptive cruise control and manual driving. In *94th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington, USA, 11-15 January 2015*. TRB.

Verberne, F. M., Ham, J., & Midden, C. J. (2012). Trust in smart systems sharing driving goals and giving information to increase trustworthiness and acceptability of smart systems in cars. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 799-810.

Vollrath, M., Schleicher, S., & Gelau, C. (2011). The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour—A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 1134-1139.

VuMA (Arbeitsgemeinschaft Verbrauchs- und Medienanalyse) (2016). Autofahrer in Deutschland nach selbst gefahrenen Kilometern pro Jahr von 2010 bis 2015. In *Statista - Das Statistik-Portal*. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/183003/umfrage/pkw---gefahrere-kilometer-pro-jahr/> [Abgerufen am 24. Februar 2016].

Warm, J. S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 433-441.

Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177.

Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. J., & Talleur, D. A. (2003). Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(3), 360-380.

Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance*. Prentice-Hall: New Jersey.

Wickens, C. D., & McCarley (2008). *Applied attention theory*. Boca-Raton, FL: Taylor & Francis.

Wickens, C. D., McCarley, J., & Steelman-Allen, K. (2009, October). NT-SEEV: A model of attention capture and noticing on the flight deck. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 53, No. 12, pp. 769-773). Sage Publications.

Wickens, C. D., Santamaria, A., & Sebok, A. (2013, September). A computational model of task overload management and task switching. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 763-767). SAGE Publications.

Wickens, C. D., Toplak, M. E., & Wiesenthal, D. L. (2008). Cognitive failures as predictors of driving errors, lapses, and violations. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3), 1223-1233.

Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety. In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar* (Vol. 117).

Wiener, E. L. (1989). Human factors of advanced technology (" glass cockpit") transport aircraft (Vol. 177528). NASA Ames Research Center.

Wulf, F., Rimini-Döring, M., Arnon, M., & Gauterin, F. (2014). Recommendations Supporting Situation Awareness in Partially Automated Driver Assistance Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.PP, no.99, pp.1-7.

Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 78, 212-221.

Ziegler, J., Bender, P., Schreiber, M., Lategahn, H., Strauss, T., Stiller, C., ... & Zeeb, E. (2014). Making Bertha Drive? An Autonomous Journey on a Historic Route. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 6(2), 8-20.

7. Anhang

7.1. Zusammenfassung Experten-Interviews Übernahmeszenarien und automatisiertes Fahren

Ergebnisse aus Experteninterviews mit Spezialisten zum Thema automatisiertes Fahren von 6 in Deutschland aktiven Automobilherstellern und Automobil-Zulieferern

Welche Fahrumgebungen eignen sich?

- Autobahn-Szenarien, gerichteter Verkehr, wenig Variabilität der Manöver, keine extremen Trajektorien-Veränderungen, keine Fußgänger/Radfahrer
- Stau-Szenarien/Stau-Assistent
- Später Landstraßen-, dann Stadtfahrten, sind aber komplizierter umzusetzen

Welche Geschwindigkeiten sind geplant?

- Max. 120/130 km/h auf Autobahnen; interne Diskussionen über komfortable Geschwindigkeit; Orientierung an internationalen Standards; höhere Geschwindigkeiten „sehr deutsche Frage“; technische Schwierigkeit der Umsetzung von hochautomatisiertem Fahren nimmt exponentiell mit der Geschwindigkeit zu
- Niedrigere Geschwindigkeiten für Stau-Szenarien (bis 40/60 km/h)

Wie lange kann die Kontrolle an das Fahrzeug übergeben werden?

- So lange wie möglich, bzw. dauerhaft für ein bestimmtes Szenario (z.B. einen zertifizierte Streckenabschnitt); Nutzung der gewonnenen Zeit ermöglichen;
- In Abhängigkeit von Überwachung des Fahrerzustands sind auch kürzere Intervalle vorstellbar
- „Zurückholen“ des Fahrers in Intervallen zum Fertigkeitserhalt eher schwer vorstellbar, wenn auch aus Human Factors-Sicht sehr sinnvoll

Welche Szenarien für einen Ausfall des hochautomatisierten Fahr-Systems gibt es?

- Umwelt-Szenarien
 - Starker Regen/Gischt/Schnee ist ein Problem für alle kamerabasierten Systeme; Kameras sind immer im „wischbaren Bereich“
 - Tiefstehende Sonne und extreme Beleuchtung/schlechte Kontraste; Gegenlicht/Blendung; Radarsysteme ermöglichen in diesen Szenarien Sicherheitspuffer
 - Dinge die das Radar blockieren (Schnee, Verschmutzungen, ...)
- Technik-Szenarien
 - Sensorsysteme bewerten die Qualität der Daten; Abgleich von redundanten Sensordaten
 - Ziel: Technik-Szenarien nicht relevant für Übergabe, da komplett redundante Systeme; Umsetzung im Moment aber noch schwierig; komplette Redundanz teilweise nicht möglich (z.B. Aktorik: Einbau von zwei Lenksäulen nicht möglich)
 - Immer möglich: Herbeiführen eines risikominimierten Zustands/Nothalt
 - Rückstufung der Automation auf ein niedrigeres Level der Assistenz bei Ausfall von Systemkomponenten, bzw. bei Unsicherheit
- Verkehrs-Szenarien
 - Sind keine sinnvollen Szenarien für eine Übergabe, da Notbremsungen/Ausweichmanöver durch Notfall-Systeme abgedeckt sind (Bremsassistent etc.); hier ist die Technik in jedem Fall besser als der Mensch
 - Pannenfahrzeug auf dem Standstreifen führt zu einer Übergabe
 - Die Meldung eines Unfalls auf der Strecke führt zu einer Übergabe

- Straßenbau-Szenarien
 - Komplexe Baustellen könnten eine Übergabe auslösen; Erkennung anhand von Kartendaten/Schilderererkennung;
 - Autobahnabfahrten/Autobahnkreuze (enger Kurvenradius derzeit nicht automatisch handhabbar)
 - Erkennen von temporären Linien nur teilweise ein Problem; Komplexität der Situation in Baustellen schwierig
 - Engstellenassistenz wird aktuell entwickelt
 - Nicht sichtbare/fehlende Fahrbahnmarkierungen sind problematisch
 - Veränderte Straßenführung
 - Verändertes Fahrzeugverhalten im Vergleich zu erwartetem Fahrzeugverhalten (z.B. Kurve und zugehörige Geschwindigkeit/Haftung überschätzt)
- Intendierte Szenarien
 - Übergabe am Ende der Autobahnstrecke/am Ende der zertifizierten Strecke
 - Keine regelmäßigen Übergaben; sinnvoll, aber keine Kundenakzeptanz

Welche Hinweise/Warnungen werden ausgegeben?

- Multimodale Hinweisreize; evtl. in Abhängigkeit von Fahrerzustandsüberwachung;
- Mindestens visuelle Anzeige +akustisches Tonsignal
- Evtl. Taktil/Haptisch (z.B. rüttelnder Sitz)
- Ambient-Light-Veränderung
- Sprache/sprachliche Aufforderungen (Analog zu Navigation)
- Mindestens 2-Stufig; eskalierende Warnungen mit Stufen der Dringlichkeit
- Bei älteren Fahrern muss besonders auf die Verständlichkeit der Übergabe geachtet werden
- Immer spezifisch und direkt warnen

Wie viel Zeit bleibt dem Fahrer für eine Übergabe?

- ~7 Sekunden TTC als Worst-Case Szenario für eine sichere Übergabe bei Fahrer 100% out-of-the-loop
- ~10 Sekunden für komfortable Übergabe
- ~3-5 Sekunden, maximal 8,8 Sekunden; Wichtig: Blick auf die Verteilung, nicht nur Mittelwerte
- Minimal ~2 Sekunden
- Frage nach komfortabler Zeit ist noch nicht geklärt

Welche Arten von Nebentätigkeiten sind während einer hochautomatisierten Fahrt vorstellbar?

- Grundsätzlich wird der Fahrer während einer hochautomatisierten Fahrt sämtliche Geräte im Fahrzeug nutzen, auch mobile Endgeräte/Nomadic Devices
- Mobile Endgeräte sind grade auch aus Sicht der aktiven Fahrzeugsicherheit (Airbags) sehr problematisch
- Optimal wäre die Nutzung des internen HMIs, aber realistisch ist auch die Nutzung von Smartphones, Tablets, Laptops
- Rückholung des Fahrers in Abhängigkeit von Fahrerzustand und Nebenaufgabe
- Kunden wollen die gewonnene Zeit für Büroarbeit nutzen
- Einschränkung der Nutzung von ausschließlich internem HMI unrealistisch vs. nur Nebentätigkeiten über internes HMI oder gespiegeltes Gerät erlaubt, damit die Kontrolle über die Anzeige in der Übergabesituation möglich ist
- Noch ungeklärt: Einfluss der Dauer der Nebentätigkeit auf die Übernahme-Fähigkeiten (Zeit, Qualität)

- Gestaltung des Fahrzeugs geht stärker Richtung HMI-Gesamtkonzept (siehe Daimler F015); Gestaltung von Fahrzeuginnenraum/Sitzkonzepten entsprechend der automatisierten Fahrt/Übergabe an den Fahrer
- Cockpit-Gesamtkonzept zunächst angelehnt an aktuelles, fahrerzentriertes Layout, zukünftig aber auch neue Mobilitätskonzepte

Zusammenfassend: Wie sieht das typische automatisierte Fahrzeug der kommenden Jahre aus?⁸

Das typische automatisierte Fahrzeug ...

...fährt auf einer Autobahn/"limited-access highway".

...fährt in gemischtem Verkehr, zusammen mit automatisierten/nicht-automatisierten Fahrzeugen.

...ist nur begrenzt mit anderen Fahrzeugen/Infrastruktur vernetzt (GPS, Mobile Data, Platooning, Car-to-X).

...bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von max. 100-130 km/h (umfasst auch Stau-Assistenten)

...fährt unabhängig von der Verkehrsdichte.

...erkennt Straßenschilder.

...erkennt alle anderen Verkehrsteilnehmer (Autobahn).

...kann die ursprüngliche Spur halten und teilweise Überholvorgänge durchführen.

...funktioniert in guten bis mittleren Wetter-/Straßenbedingungen (trocken, gute Sicht, leichter Regen, trockene/nasse Fahrbahn).

...erlaubt teilweise die Nutzung von externen Geräten und internen HMIs während der Fahrt

...fährt nicht nur in Intervallen/zeitlich begrenzt automatisiert.

...erkennt zuverlässig Systemgrenzen.

...initiiert die Übernahme/Übergabe vom Fahrer/an den Fahrer mit einem Zeitpuffer.

...informiert den Fahrer multimodal über eine bevorstehende Übergabe.

...kann jederzeit einen risikominimalen Zustand herbeiführen (z.B. Nothalt).

⁸ Abgeleitet aus den Experteninterviews und Recherche in Literatur und Pressemitteilungen zu aktueller Forschungsaktivität der Automobilhersteller

7.2. Fragebogen zur Bewertung der Anforderungen an ein Spiel als ablenkende Nebenaufgabe beim automatisierten Fahren

Bitte bewerte das soeben gespielte Spiel auf der Skala von „Überhaupt nicht zutreffend“ bis „Sehr zutreffend“.

VP-Nr. _____

	Überhaupt nicht				Sehr
Es hat mir Spaß gemacht das Spiel zu spielen					
Ich habe während des Spiels fast nichts mehr von meiner Umgebung wahrgenommen					
Es ärgert mich wenn ich das Spiel unterbrechen muss					
Die Steuerung des Spiels war leicht zu erlernen					
Ich musste häufig klicken oder tippen um die Spielaufgabe zu bewältigen					
Ich freue mich wenn ich eine hohe Punktzahl bei dem Spiel erreiche					
Ich hatte während des Spiels nie das Bedürfnis das Spiel zu stoppen um zu schauen was um mich herum passiert					
Ich war enttäuscht, dass das Spiel vorbei war als ich unterbrochen wurde					
Ich brauchte schnell nicht mehr über die Steuerung des Spiels nachzudenken					
Die Koordination der Bewegungen im Spiel war anspruchsvoll					
Ich war während des Spielens motiviert					

Es fühlte sich an, als sei nur eine sehr kurze Zeit während des Spielens vergangen					
Ich hätte eine bessere Punktzahl in dem Spiel erreicht wenn ich nicht unterbrochen worden wäre					
Ich denke ich habe in dem Spiel gut abgeschnitten					
Für das Spiel war es wichtig zu welchem Zeitpunkt ich welche Tasten geklickt/getippt habe					
Ich wollte das Spiel „gewinnen“					
Das Spiel hat meine Aufmerksamkeit stark an sich gebunden					
Es hat mich geärgert, dass es keine Möglichkeit gab den aktuellen Spielstand zu speichern und später fortzusetzen					
Es gab keine Zeitpunkte während des Spiels an denen ich einfach aufgeben wollte					
Ich musste das klicken/tippen der Tasten koordinieren, um im Spiel erfolgreich zu sein					
Ich würde das Spiel noch einmal spielen wollen					
Mir war die Verwendung der Steuerung während des Spielens teilweise nicht mehr bewusst					
Es fiel mir schwer das Spiel zu unterbrechen					
Die Steuerung des Spiels hat immer das bewirkt was ich wollte					
Es war für den Erfolg im Spiel wichtig, dass ich die ganze Zeit meine Hände benutze					

7.3. Instruktionen für die Trainingsfahrt

Vielen Dank, dass Sie an unserem Versuch zu Assistenzsystemen im Fahrzeug teilnehmen!

Bitte lesen Sie den folgenden Text aufmerksam und gründlich. Falls Sie Fragen zu den Instruktionen haben, zögern Sie nicht den Versuchsleiter anzusprechen. Der Versuch dauert etwa 2 Stunden, Ihre Aufwandsentschädigung beträgt 20€.

In diesem Versuch möchten wir herausfinden, wie Menschen sich bei der Interaktion mit Assistenzsystemen im Simulator verhalten. Sie werden eine Reihe von Fahrsituationen auf der Autobahn erleben, die auch in der Realität so vorkommen können. Bitte reagieren Sie in den Situationen möglichst so, wie Sie es auch in einem eigenen Fahrzeug in der Realität tun würden. Halten Sie hierbei bitte die Straßenverkehrsordnung ein, und beachten Sie die Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke.

Bevor Sie ein Fahrmanöver einleiten, sichern Sie ihre Umgebung ausreichend ab, so wie Sie es auch in der Realität tun würden. Vermeiden Sie hektische Notfall-Manöver, sowie Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern, bzw. mit den Fahrbahnbegrenzungen.

Zunächst werden Sie auf einer Übungsfahrt das Fahren mit dem Simulator kennen lernen. Bitte fahren Sie zunächst auf die Autobahn, beschleunigen auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h, und halten dann diese Geschwindigkeit.

In dieser Übungsfahrt ist ihr Fahrzeug mit einem Assistenzsystem ausgestattet, das die vollständige Steuerung ihres Fahrzeugs übernehmen kann (Lenkung, Gas, Bremsen). Sobald das System bereit ist, informiert Sie eine Anzeige über die Möglichkeit die Steuerung an das Assistenzsystem abzugeben. Sobald das System bereit ist, ziehen Sie bitte den Hebel hinter dem Lenkrad, der das System aktiviert. Bitte nehmen Sie anschließend die Hände vom Lenkrad, und stellen die Füße komfortabel in den Fußraum.

Es gibt einige Fahrsituationen, die das Fahrzeug nicht alleine bewältigen kann. Diese Fahrsituationen werden von dem Fahrzeug zu 100% richtig erkannt, und Sie werden von dem Fahrzeug in jedem Fall mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert. Sollte eine solche Situation eintreten, wird das Fahrzeug Sie über einen Ton, sowie über eine Anzeige darauf hinweisen, und Sie bitten die Kontrolle über die Steuerung (Lenken, Gas, Bremsen) zu übernehmen. **Das System schaltet sich ab, sobald Sie entweder den Hebel hinter dem Lenkrad erneut ziehen, oder die Bremse treten.**

Das Assistenzsystem bleibt immer so lange aktiv, bis Sie eine dieser Möglichkeiten zum Abschalten des Systems nutzen. Bitte übernehmen Sie daher die Steuerung von dem Fahrzeug in allen Fällen so, dass Sie die Situation sicher beherrschen, bevor Sie das System deaktivieren.

7.4. Instruktionen für die Versuchsfahrten

In den folgenden Unterpunkten sind die jeweils gegebenen Instruktionen für die Versuchsgruppen *Manuell*, *Überwacht*, *Lesen* und *Spiel* dargestellt.

7.4.1. Instruktionen für die Gruppe *Manuell*

Bitte lesen Sie den folgenden Text aufmerksam und gründlich. Falls Sie Fragen zu den Instruktionen haben, zögern Sie nicht den Versuchsleiter anzusprechen.

Bitte halten Sie sich weiterhin an die Instruktionen aus der Probandeninformation. Wir haben die wichtigsten Punkte hier noch einmal für Sie zusammengefasst:

- Halten Sie sich an die **Straßenverkehrsordnung** und reagieren Sie möglichst so, wie Sie auch in der Realität reagieren würden.
- Beschleunigen Sie auf eine Geschwindigkeit von **120 km/h** und halten Sie dann diese Geschwindigkeit. Kehren Sie wenn möglich auch immer wieder zu dieser Geschwindigkeit zurück.
- Vermeiden Sie hektische Fahrmanöver und Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern, bzw. den Fahrbahnbegrenzungen.
- Ihr Fahrzeug hat ein **Assistenzsystem**, das Sie über einen Ton auf Fahrsituationen hinweist, die es als potentiell schwierig erkannt hat.
- Es kann vorkommen, dass Ihnen ein **Verkehrsmanagement-System** einen Vorschlag für die Wahl einer optimalen Spur macht. Bitte folgen Sie diesem Hinweis, und wechseln Sie entsprechend die Spur.

7.4.2. Instruktionen für die Gruppe *Überwacht*

Bitte lesen Sie den folgenden Text aufmerksam und gründlich. Falls Sie Fragen zu den Instruktionen haben, zögern Sie nicht den Versuchsleiter anzusprechen.

Bitte halten Sie sich weiterhin an die Instruktionen aus dem vorangegangenen Text. Wir haben die wichtigsten Punkte hier noch einmal für Sie zusammengefasst:

- Halten Sie sich an die **Straßenverkehrsordnung** und reagieren Sie möglichst so, wie Sie auch in der Realität reagieren würden
- Beschleunigen Sie auf eine Geschwindigkeit von **120 km/h** und halten Sie dann diese Geschwindigkeit
- Vermeiden Sie hektische Fahrmanöver und Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern, bzw. den Fahrbahnbegrenzungen
- Ihr Fahrzeug hat ein **Assistenzsystem**, das die vollständige Steuerung ihres Fahrzeugs übernehmen kann (Lenkung, Gas, Bremsen).
- Sobald das System bereit ist, ziehen Sie bitte den **Hebel hinter dem Lenkrad**, der das System aktiviert. Bitte nehmen Sie anschließend die Hände vom Lenkrad, und stellen die Füße komfortabel in den Fußraum.
- **Es gibt einige Fahrsituationen, die das Fahrzeug nicht alleine bewältigen kann.** Diese Fahrsituationen werden von dem Fahrzeug zu 100% richtig erkannt, und Sie werden von dem Fahrzeug in jedem Fall mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert.

- Sollte eine solche Situation eintreten, wird das Fahrzeug Sie über einen Ton, sowie über eine Anzeige darauf hinweisen, und Sie bitten die Kontrolle über die Steuerung (Lenken, Gas, Bremsen) zu übernehmen.
- Das System schaltet sich ab, sobald Sie entweder den Hebel hinter dem Lenkrad erneut ziehen, oder die Bremse treten.
- **Das Assistenzsystem bleibt immer so lange aktiv, bis Sie in die Steuerung eingreifen.** Bitte übernehmen Sie daher die Steuerung von dem Fahrzeug in allen Fällen so, dass Sie die Situation sicher beherrschen, bevor Sie in die Steuerung eingreifen.

		
<p>Das Assistenzsystem ist bereit zur Übernahme der Steuerung (Lenkung, Gas, Bremsen).</p>	<p>Das Assistenzsystem ist aktiv und übernimmt die Überwachung der Umgebung, sowie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>	<p>Das Assistenzsystem hat eine Situation erkannt, die ein Eingreifen des Fahrers erforderlich macht. Bitte übernehmen Sie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>

7.4.3. Instruktionen für die Gruppe Lesen

Bitte lesen Sie den folgenden Text aufmerksam und gründlich. Falls Sie Fragen zu den Instruktionen haben, zögern Sie nicht den Versuchsleiter anzusprechen.

Bitte halten Sie sich weiterhin an die Instruktionen aus dem vorangegangenen Text. Wir haben die wichtigsten Punkte hier noch einmal für Sie zusammengefasst:

- Halten Sie sich an die **Straßenverkehrsordnung** und reagieren Sie möglichst so, wie Sie auch in der Realität reagieren würden
- Beschleunigen Sie auf eine Geschwindigkeit von **120 km/h** und halten Sie dann diese Geschwindigkeit
- Vermeiden Sie hektische Fahrmanöver und Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern, bzw. den Fahrbahnbegrenzungen
- Ihr Fahrzeug hat ein **Assistenzsystem**, das die vollständige Steuerung ihres Fahrzeugs übernehmen kann (Lenkung, Gas, Bremsen).
- Sobald das System bereit ist, ziehen Sie bitte den **Hebel hinter dem Lenkrad**, der das System aktiviert. Bitte nehmen Sie anschließend die Hände vom Lenkrad, und stellen die Füße komfortabel in den Fußraum.
- **Es gibt einige Fahrsituationen, die das Fahrzeug nicht alleine bewältigen kann.** Diese Fahrsituationen werden von dem Fahrzeug zu 100% richtig erkannt, und Sie

werden von dem Fahrzeug in jedem Fall mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert.

- Sollte eine solche Situation eintreten, wird das Fahrzeug Sie über einen Ton, sowie über eine Anzeige darauf hinweisen, und Sie bitten die Kontrolle über die Steuerung (Lenken, Gas, Bremsen) zu übernehmen.
- Das System schaltet sich ab, sobald Sie entweder den Hebel hinter dem Lenkrad erneut ziehen, oder die Bremse treten.
- **Das Assistenzsystem bleibt immer so lange aktiv, bis Sie in die Steuerung eingreifen.** Bitte übernehmen Sie daher die Steuerung von dem Fahrzeug in allen Fällen so, dass Sie die Situation sicher beherrschen, bevor Sie in die Steuerung eingreifen.

Während das Assistenzsystem die Steuerung des Fahrzeugs übernimmt sollen Sie **die Zeit nutzen, um einige interessante Zeitschriftenartikel zu lesen**, die wir auf einem Tablet-PC für Sie vorbereitet haben. Bitte lesen Sie die Artikel aufmerksam, und versuchen Sie sich den Inhalt einzuprägen. Halten Sie den Tablet-PC beim Lesen auf eine für Sie komfortable Art und Weise.

		
<p>Das Assistenzsystem ist bereit zur Übernahme der Steuerung (Lenkung, Gas, Bremsen).</p>	<p>Das Assistenzsystem ist aktiv und übernimmt die Überwachung der Umgebung, sowie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>	<p>Das Assistenzsystem hat eine Situation erkannt, die ein Eingreifen des Fahrers erforderlich macht. Bitte übernehmen Sie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>

7.4.4. Instruktionen für die Gruppe *Spiel*

Bitte lesen Sie den folgenden Text aufmerksam und gründlich. Falls Sie Fragen zu den Instruktionen haben, zögern Sie nicht den Versuchsleiter anzusprechen.

Bitte halten Sie sich weiterhin an die Instruktionen aus dem vorangegangenen Text. Wir haben die wichtigsten Punkte hier noch einmal für Sie zusammengefasst:

- Halten Sie sich an die **Straßenverkehrsordnung** und reagieren Sie möglichst so, wie Sie auch in der Realität reagieren würden
- Beschleunigen Sie auf eine Geschwindigkeit von **120 km/h** und halten Sie dann diese Geschwindigkeit
- Vermeiden Sie hektische Fahrmanöver und Zusammenstöße mit anderen Verkehrsteilnehmern, bzw. den Fahrbahnbegrenzungen

- Ihr Fahrzeug hat ein **Assistenzsystem**, das die vollständige Steuerung ihres Fahrzeugs übernehmen kann (Lenkung, Gas, Bremsen).
- Sobald das System bereit ist, ziehen Sie bitte den **Hebel hinter dem Lenkrad**, der das System aktiviert. Bitte nehmen Sie anschließend die Hände vom Lenkrad, und stellen die Füße komfortabel in den Fußraum.
- **Es gibt einige Fahrsituationen, die das Fahrzeug nicht alleine bewältigen kann.** Diese Fahrsituationen werden von dem Fahrzeug zu 100% richtig erkannt, und Sie werden von dem Fahrzeug in jedem Fall mit einem Zeitpuffer vor dem Eintreten der Situation informiert.
- Sollte eine solche Situation eintreten, wird das Fahrzeug Sie über einen Ton, sowie über eine Anzeige darauf hinweisen, und Sie bitten die Kontrolle über die Steuerung (Lenken, Gas, Bremsen) zu übernehmen.
- Das System schaltet sich ab, sobald Sie entweder den Hebel hinter dem Lenkrad erneut ziehen, oder die Bremse treten.
- **Das Assistenzsystem bleibt immer so lange aktiv, bis Sie in die Steuerung eingreifen.** Bitte übernehmen Sie daher die Steuerung von dem Fahrzeug in allen Fällen so, dass Sie die Situation sicher beherrschen, bevor Sie in die Steuerung eingreifen

Während das Assistenzsystem die Steuerung des Fahrzeugs übernimmt, sollen Sie **die Zeit nutzen, um ein Spiel zu spielen**, das wir auf einem Tablet-PC für Sie vorbereitet haben. Bitte widmen Sie ihre Aufmerksamkeit ganz dem Spiel, und versuchen Sie eine möglichst hohe Punktzahl zu erreichen. Halten Sie den Tablet-PC beim Spielen auf eine für Sie komfortable Art und Weise mit beiden Händen.

		
<p>Das Assistenzsystem ist bereit zur Übernahme der Steuerung (Lenkung, Gas, Bremsen).</p>	<p>Das Assistenzsystem ist aktiv und übernimmt die Überwachung der Umgebung, sowie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>	<p>Das Assistenzsystem hat eine Situation erkannt, die ein Eingreifen des Fahrers erforderlich macht. Bitte übernehmen Sie die Steuerung des Fahrzeugs.</p>

7.5. Fragebogen zu Vertrauen in automatisierte Fahrerassistenzsysteme

Die folgenden Aussagen sollen das Vertrauen zwischen Menschen und automatisierten Fahrerassistenzsystemen evaluieren. Die Aussagen beziehen sich auf die Intensität Ihres Gefühls von Vertrauen in das erlebte Fahrerassistenzsystem. Bitte markieren Sie in jedem Kästchen auf der Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (sehr) wie sehr die Aussage für Sie zutrifft.

Ich kann mich auf die Fähigkeiten des Systems verlassen

Überhaupt
nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Ich weiß wie das System funktioniert

Überhaupt
nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Das System ist verlässlich

Überhaupt
nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Das System verhält sich auf eine unvorhersehbare Weise

Überhaupt nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Das System ist sicher

Überhaupt nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Ich bin wachsam gegenüber dem System

Überhaupt nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Ich kann dem System vertrauen

Überhaupt nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Ich bin argwöhnisch gegenüber den Absichten, Handlungen und Ausgaben des SystemsÜberhaupt
nicht

Sehr

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

7.6. Fragebogen zu Diskomfort bei der Verwendung von automatisierten Fahrerassistenzsystemen

Im Folgenden werden Sie zu ihren Emotionen während der automatisierten Fahrt befragt. Kreuzen Sie bitte an, wie Sie sich während der erlebten automatisierten Fahrsituationen mit dem Fahrerassistenzsystem gefühlt haben.

Ich habe mich während der Fahrt sicher gefühlt

Trifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Ich hatte immer die Kontrolle über das System

Trifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Das System erhöht die Sicherheit

Trifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Die Nutzung des Systems ist unangenehm

Trifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Ich hatte das Gefühl stets rechtzeitig eingreifen zu können

Trifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Das System geht kein unnötiges Risiko einTrifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Das System ist für mich eine zusätzliche BelastungTrifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Ich wusste häufig nicht, was das System als nächstes machen wirdTrifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Das System entlastet mich als FahrerTrifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

Ich fühlte mich durch das System in Gefahr gebrachtTrifft gar nicht
zu

Neutral

Trifft völlig zu

7.7. Fragebogen zu Kontrollierbarkeit und Beanspruchung nach jeder Übernahmesituation

Wie war die vorangegangene Situation?

Bitte schauen Sie sich zunächst die Kategorien der folgenden Skalen an, und entscheiden sich für ein Wort, das die vorangegangene Situation am besten beschreibt. Anschließend verfeinern Sie ihr Urteil und kreuzen die Kategorie an, die am besten ihre Erfahrung wiedergibt.

Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar	10
	9
Gefährlich	8
	7
Unangenehm	6
	5
	4
Harmlos	3
	2
	1
Vollständig kontrollierbar	0

Wie beanspruchend war die vorangegangene Situation?

Gar nicht	Sehr gering			Gering			Mittel			Hoch			Sehr hoch		
	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Wie risikoreich war die vorangegangene Situation?

Gar nicht	Sehr gering			Gering			Mittel			Hoch			Sehr hoch		
	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

War die Übernahme der manuellen Kontrolle über das Fahrzeug unkomfortabel?

Gar nicht	Sehr gering			Gering			Mittel			Hoch			Sehr hoch		
	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Wie dringlich oder hastig war die Übernahme der manuellen Kontrolle über das Fahrzeug?

Gar nicht	Sehr gering			Gering			Mittel			Hoch			Sehr hoch		
	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

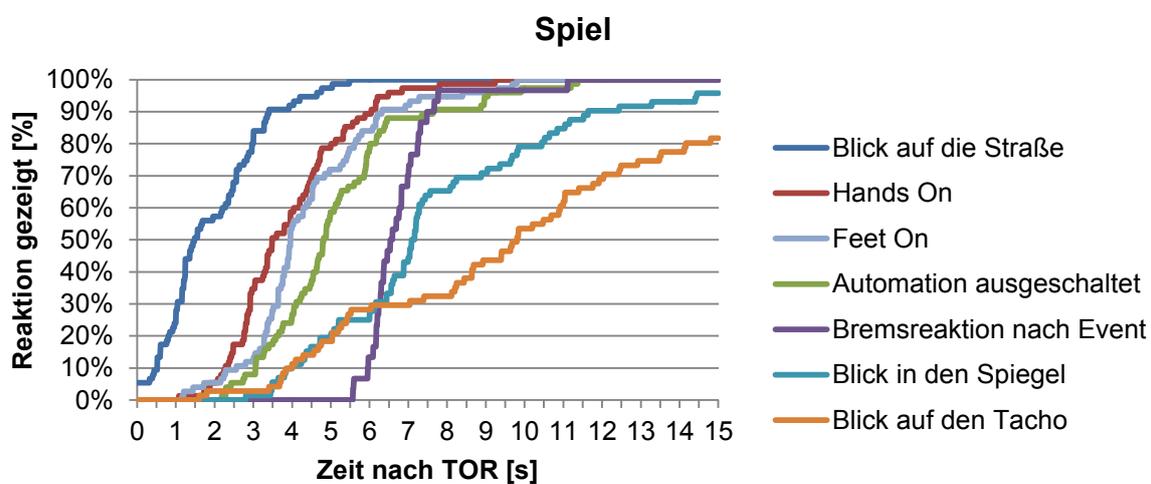
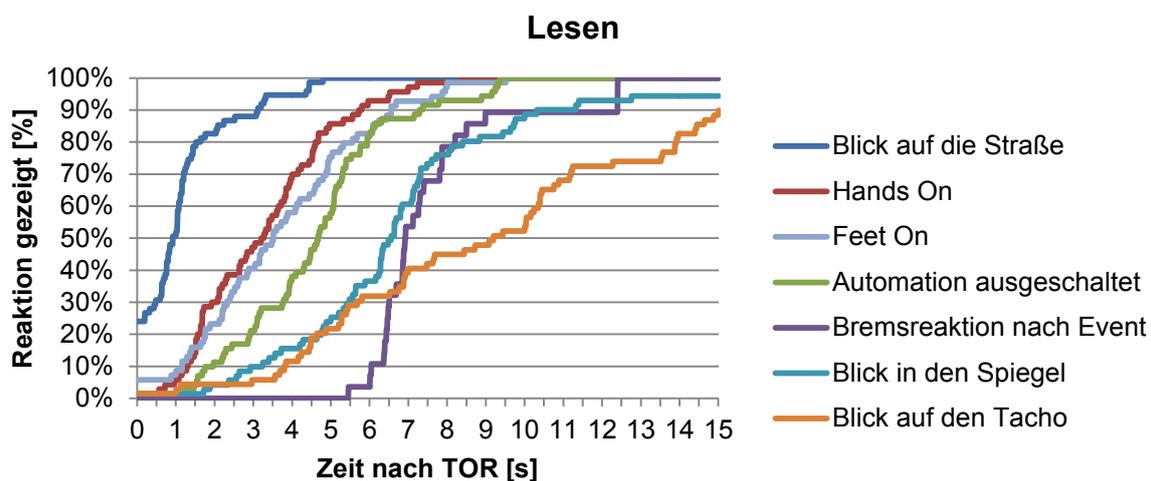
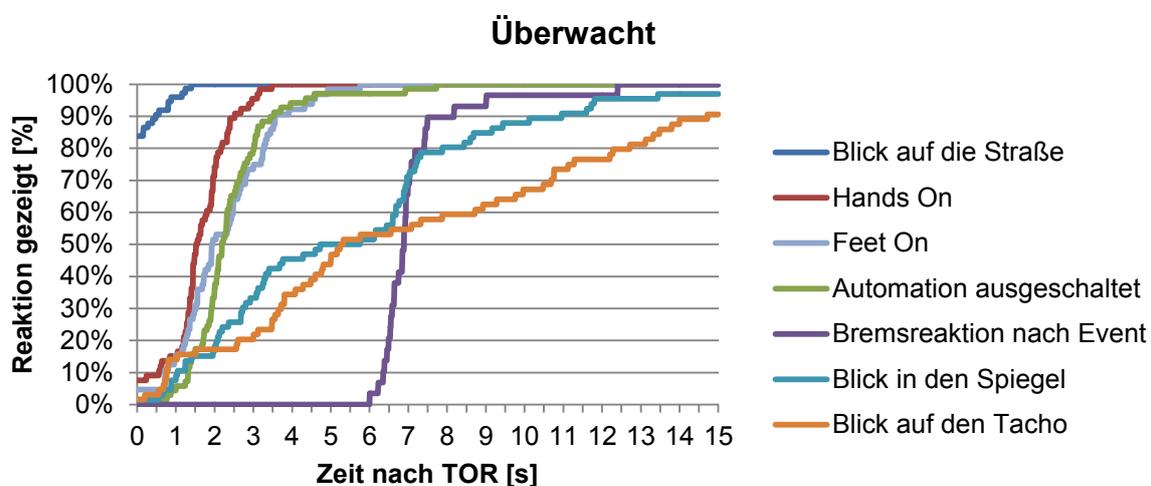
Warum hat das Fahrzeug Ihrer Meinung nach die Kontrolle über die Steuerung an Sie zurückgegeben?

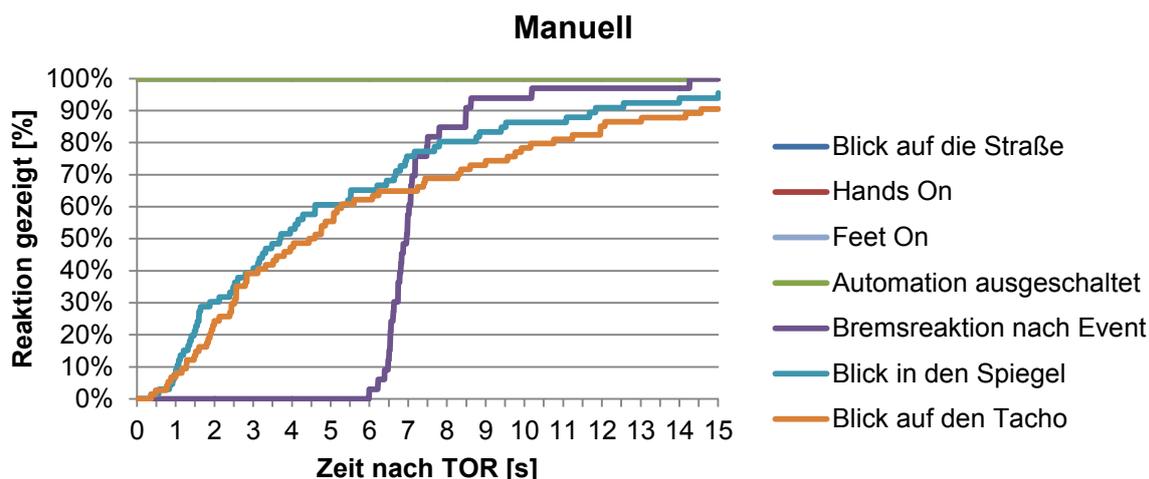
War die Übergabe der Steuerung für Sie verständlich und nachvollziehbar?

Ja Nein

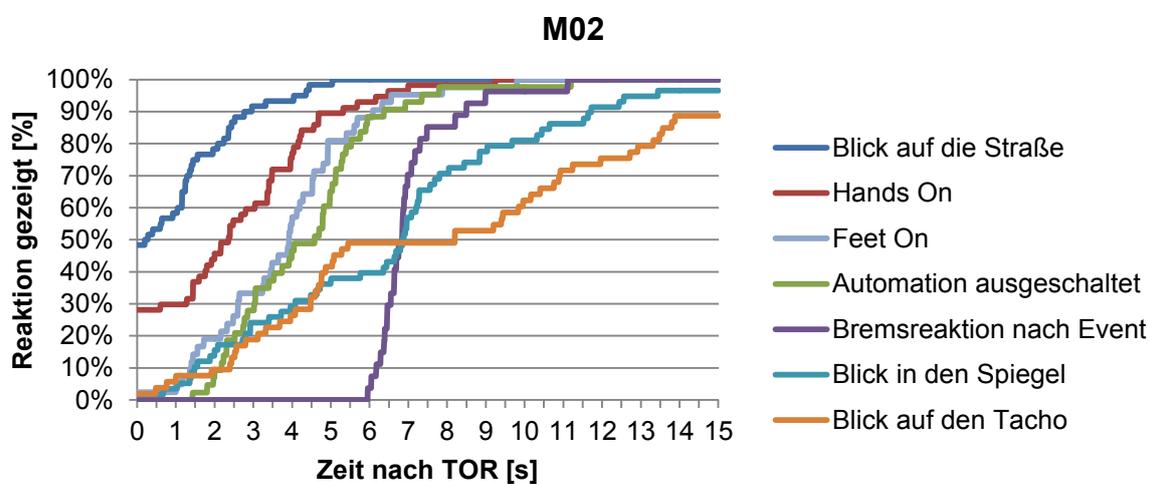
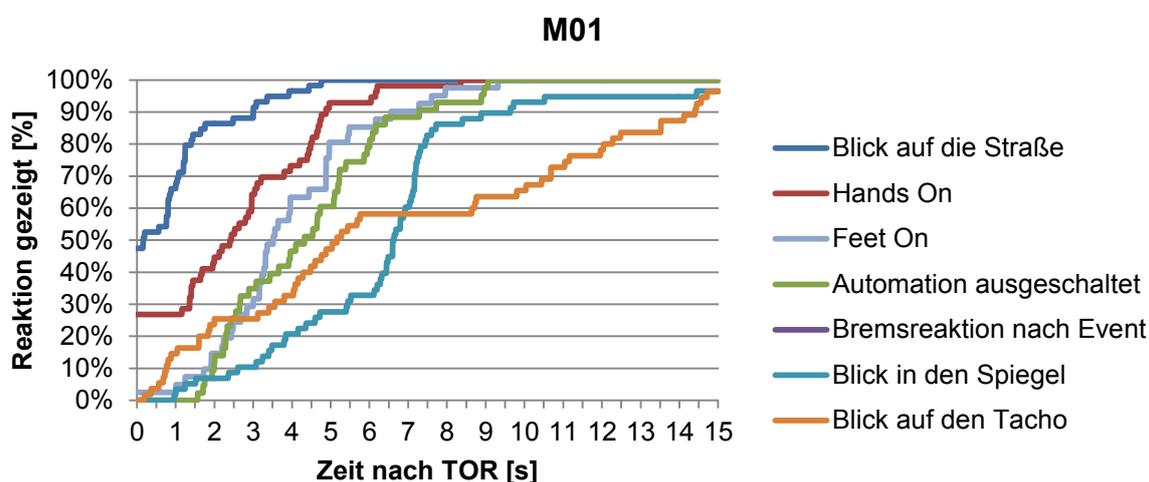
War die Übergabe der Steuerung für Sie akzeptabel? Ja Nein

7.8. Ergänzende Darstellungen der Reaktionen auf den TOR für die einzelnen Versuchsgruppen

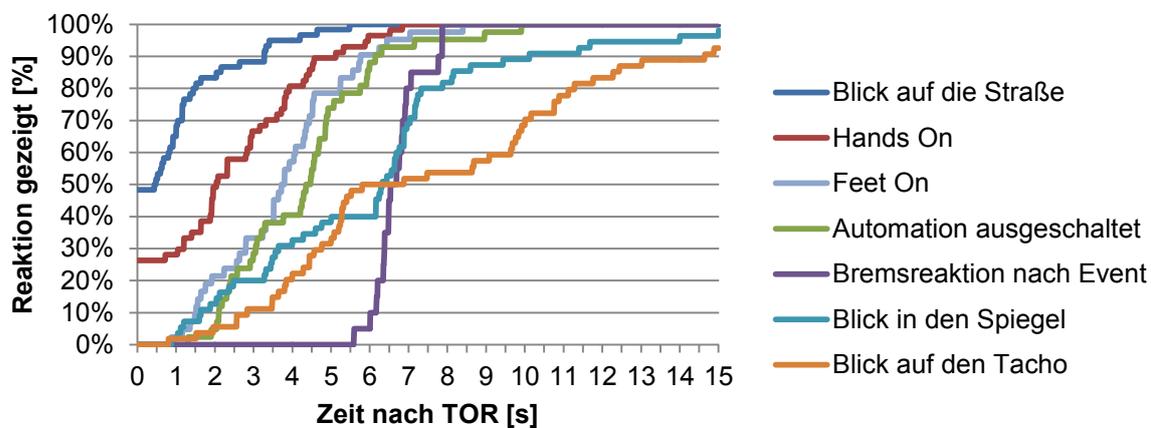




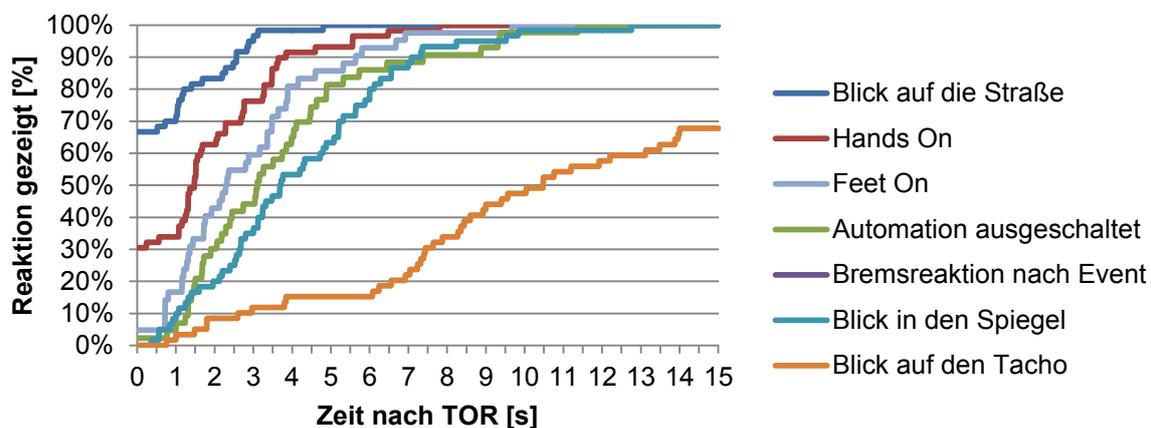
7.9. Ergänzende Darstellungen der Reaktionen auf den TOR für die einzelnen Szenarien



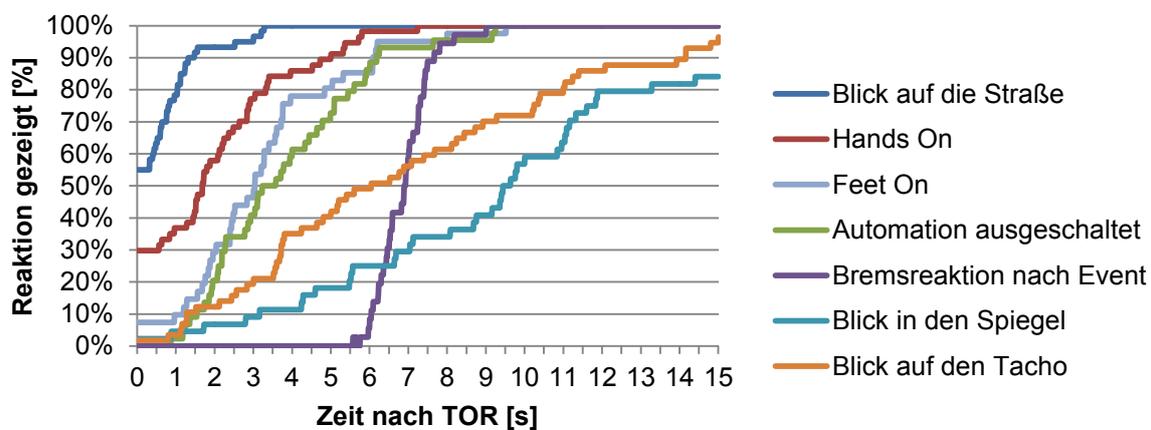
M03



M04



M05





Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Wilhelmstraße 43 / 43G, 10117 Berlin
Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

Telefon 030 / 20 20 - 50 00, Fax 030 / 20 20 - 60 00
Internet: www.gdv.de, www.udv.de