
Frühzeitige Informationen über Systemgrenzen beim hochautomatisierten Fahren

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Fakultät für Humanwissenschaften der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg



Vorgelegt von
Katharina Wiedemann
aus München

Würzburg 2020

Erstgutachter: Professor Dr. Wilfried Kunde
Zweitgutachter: Professor Dr. Lynn Huestegge

Tag des Kolloquiums: 30.10.2020

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projekts „AdaptIVe“ am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (GmbH).

Herrn Prof. Dr. Wilfried Kunde möchte ich herzlich für die Betreuung dieser Arbeit, den produktiven Austausch und die wertvollen Ideen danken. Mein herzlicher Dank geht weiterhin an Herrn Prof. Dr. Lynn Huestegge für die bereichernden Anmerkungen im Rahmen des Projektseminars und Frau Prof. Dr. Tanja Bipp für das Interesse an meiner Arbeit. Herrn Dr. Rainer Scheuchenpflug danke ich herzlich für die besondere methodische Ausbildung im Rahmen des Psychologiestudiums und die anregenden Kommentare während der Entstehung dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen am WIVW für die großartige Unterstützung in Zusammenhang mit dieser Arbeit. Alexandra Neukum für die Ermöglichung dieser Arbeit im Rahmen des EU-Projekts. Dr. Nadja Schömig und Dr. Frederik Naujoks für die Unterstützung von Beginn an, die wertvollen fachlichen Diskussionen und das beste Projektteam, das man sich vorstellen kann. Weiterhin möchte ich allen Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften danken, die für den Aufbau und den Betrieb der Fahrsimulationsumgebung für die empirischen Studien unverzichtbare Arbeit geleistet haben. Michael Hanig für die Einbindung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in die Fahrsimulation. Lukas Virsik und Jürgen Pichen für die Programmierung der Tabletanwendung. Samantha Fritsch für die grafische Umsetzung der Anzeigengestaltung. Julia Reichling und Christoph Mai für die wichtigen Vorarbeiten in ihren Bachelor- und Masterarbeiten im Rahmen des AdaptIVe-Projekts. Simon Höfling und Nils Müller für die Unterstützung bei der Studienvorbereitung und der Datenerhebung. Und natürlich Sonja Hoffmann für die Rekrutierung der Studienteilnehmer aus dem Probanden-Panel des WIVW.

Meinen Freunden und meiner Familie möchte ich für die persönliche Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit danken. Meinen Eltern dafür, dass sie immer für mich da sind und mich auf allen meinen Wegen unterstützen. Frederik, mein größter Dank geht an dich. Für deine unersetzliche Unterstützung, die kontinuierliche Motivation und dein Verständnis.

Zusammenfassung

Fahrzeughersteller haben die Verfügbarkeit sogenannter hochautomatisierter Fahrfunktionen (SAE Level 3; SAE, 2018) in ihren Modellen angekündigt. Hierdurch wird der Fahrer in der Lage sein, sich permanent von der Fahraufgabe abzuwenden und fahrfremden Tätigkeiten nachzugehen. Allerdings muss er immer noch als Rückfallebene zur Verfügung stehen, um im Fall von Systemgrenzen oder -fehlern (siehe Gold, Naujoks, Radlmayr, Bellem & Jarosch, 2017), die Fahrzeugkontrolle zu übernehmen. Das Übernahmeerfordernis wird dem Fahrer durch die Ausgabe einer Übernahmeaufforderung vermittelt. Die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung aus dem hochautomatisierten Fahren stellt aus psychologischer Sicht einen Aufgabenwechsel dar. Bei der Untersuchung von Aufgabenwechseln im Bereich der kognitiven und angewandten Psychologie zeigte sich vielfach, dass Aufgabenwechsel mit verlängerten Reaktionszeiten und erhöhten Fehlerraten assoziiert sind. Für den Anwendungsfall des automatisierten Fahrens liegen ebenfalls eine Reihe empirischer Studien vor, die darauf hinweisen, dass der Wechsel zum manuellen Fahren mit einer Verschlechterung der Fahrleistung gegenüber dem manuellen Fahren verbunden ist. Da Erkenntnisse vorliegen, dass eine Vorbereitung auf den Aufgabenwechsel die zu erwartenden Kosten verringern kann, ist das Ziel dieser Arbeit die Konzeption und empirische Evaluation einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, die Nutzer hochautomatisierter Fahrzeuge durch frühzeitige Vorinformationen über Systemgrenzen auf die Kontrollübernahme vorbereitet.

Drei Experimente im Fahrsimulator mit Bewegungssystem betrachteten jeweils unterschiedliche Aspekte frühzeitiger Vorinformationen über bevorstehende Übernahmen. Das erste Experiment untersuchte, ob Fahrer überhaupt von frühzeitigen Situationsankündigungen, beispielsweise im Sinne einer verbesserten Übernahmeleistung, profitieren. Das zweite Experiment befasste sich mit der Frage, wie solche Ankündigungen zeitlich und inhaltlich zu gestalten sind (d. h. wann sie präsentiert werden und welche Informationen sie enthalten sollten), und welchen Einfluss deren Gestaltung auf die Aufgabenbearbeitung (insbesondere deren Unterbrechung und spätere Wiederaufnahme) während der automatisierten Fahrt hat. Um herauszufinden, wie ein Anzeige-konzept zur längerfristigen Planung von fahrfremden Tätigkeiten während des automatisierten Fahrens beitragen könnte, fand im dritten Experiment ein Vergleich von Situationsankündigungen, die vor dem Erreichen einer Übernahmesituation ausgegeben wurden, mit kontinuierlich präsentierten Informationen über die verbleibende Distanz zur nächsten Systemgrenze statt. In allen Studien wurde neben den Auswirkungen frühzeitiger Vorinformationen auf die Übernahmeleistung und Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten auch untersucht, welche Auswirkungen ein erweitertes Übernahmekonzept auf die Fahrerreaktion in

Grenz- und Fehlerfällen, in denen Vorinformationen entweder nicht oder fehlerhaft angezeigt wurden, hat.

Für die Gestaltung zukünftiger Übernahmekonzepte für hochautomatisierte Fahrzeuge kann basierend auf den Ergebnissen empfohlen werden, frühzeitige Anzeigen von Systemgrenzen zur Ermöglichung eines sicheren und komfortablen Wechsels zwischen dem manuellen und dem automatisierten Fahren in die Mensch-Maschine-Schnittstelle zu integrieren. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit liegt der empfohlene Zeitpunkt für diskrete Ankündigungen bei einer Reisegeschwindigkeit von 120 km/h bei etwa 1000 Meter (d. h. ca. 30 Sekunden) vor der Ausgabe der Übernahmeaufforderung. Zudem wird empfohlen zur Abschätzung der verbleibenden Zeit im automatisierten Modus eine Anzeige der Entfernung zur nächsten Systemgrenze in das Konzept zu integrieren, die dem Fahrer eine längerfristige Aufgabenplanung ermöglicht. Neben der reinen Anzeige des Übernahmeerfordernisses sollten dem Fahrer auch Informationen über das erforderliche Fahrmanöver nach der Kontrollübernahme übermittelt werden.

Summary

Vehicle manufacturers have announced the availability of so-called conditionally automated driving (SAE Level 3, SAE, 2018) in their upcoming vehicles. As a result, drivers will no longer have to permanently carry out the driving task and are free to pursue non-driving related activities while the vehicle is conditionally automated. However, they still have to be available as a fallback to take over vehicle control in the event of a system limit or error (see Gold, Naujoks, Radlmayr, Bellem & Jarosch, 2017). The requirement to take over driving is communicated via a so-called takeover request. From a psychological point of view, taking over manual vehicle control after driving with the automation represents a task switch. Studies from the field of cognitive and applied psychology have shown that task switches are associated with prolonged reaction times and increased error rates. Regarding the application of these findings to automated driving, there are also a number of empirical studies indicating that switching to manual driving takes considerable time and is associated with a deterioration of driving performance compared to continuous manual driving. Since there is evidence that preparation for the task switch can reduce the expected costs, the aim of this work is the conception and empirical evaluation of a human-machine-interface (HMI), which prepares users of conditionally automated vehicles for the takeover by providing them with early information about system limits.

Three experiments in a motion-based driving simulator considered different aspects of early information about an upcoming system limit. The first experiment examined whether drivers benefit from early situation announcements compared to imminent takeover requests, for example in terms of improved takeover performance. The second experiment dealt with the question of how such announcements are to be designed in terms of their timing and content (i. e., when they should be presented and what information they should contain), and how they influence the interruption and subsequent resumption of non-driving related tasks that are carried out during the automated drive. To find out how the HMI could contribute to longer-term planning of non-driving related activities during automated driving, a comparison of discrete situation announcements issued before reaching a takeover situation with continuously presented information about the remaining distance to the next system limit took place in the third study. In addition to the effects of early information on takeover performance and engagement in non-driving related tasks, all studies also examined the effects of the extended takeover concept on the driver's reaction during system failures in which prior information is either not displayed or is displayed incorrectly.

Based on the results, it may be recommended to integrate early indications of system limits to enable a safe and comfortable task switch between automated and manual driving. The recommended timing for discrete announcements at a cruising speed of 120 km/h is approximately

1000 meter (i. e., approximately 30 seconds) before issuing an imminent takeover request right before the system limit. It is also recommended to include an indication of the remaining distance to an upcoming system limit in the display concept, which allows for a longer-term planning of non-driving related task during the automated driving. In addition to the mere indication of the takeover requirement, the driver should also be provided with information about the required driving maneuver after the takeover of control.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Hintergrund und Problemdefinition.....	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit.....	4
2	THEORETISCHER HINTERGRUND	6
2.1	Kognitionspsychologische Grundlagen	6
2.1.1	Vom Multitasking zum Aufgabenwechsel	6
2.1.2	Wechsel- und Wiederaufnahmekosten	7
2.2	Übernahmeprozess beim automatisierten Fahren.....	9
2.2.1	Hochautomatisierte Fahrt	10
2.2.2	Transition zum manuellen Fahren.....	11
2.2.3	Manuelle Fahrt.....	14
2.2.4	Transition zurück zum hochautomatisierten Fahren	15
2.3	Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle	16
2.3.1	Bereitstellung frühzeitiger Informationen über die Notwendigkeit zur Übernahme	18
2.3.1.1	Vorbereiten der Übernahme.....	18
2.3.1.2	Vorbereitung der Unterbrechung fahrfremder Tätigkeiten.....	19
2.3.2	Zeitpunkt der Vorinformation.....	20
2.3.2.1	Event-basierte Ankündigung zur taktischen Unterstützung.....	22
2.3.2.2	Start-basierte Vorausschau zur strategischen Unterstützung	24
2.3.3	Spezifität der Vorinformationen	25
2.3.3.1	Grund der Übernahmeaufforderung.....	27
2.3.3.2	Örtliche Informationen	28
2.3.3.3	Erforderliches Fahrmanöver.....	30
2.3.4	Zusammenfassung	31
2.4	Automationsvertrauen und Systemfehler	32
3	EMPIRISCHER TEIL	35
3.1	Studie 1: Frühzeitige Situationsankündigungen	35

3.1.1	Fragestellung	35
3.1.2	Methodik	37
3.1.2.1	Versuchsumgebung	37
3.1.2.2	Versuchsdesign	38
3.1.2.3	Gestaltung der Fahrzeugautomation	41
3.1.2.4	Mensch-Maschine-Schnittstelle	42
3.1.2.5	Fahrfremde Tätigkeit	43
3.1.2.6	Versuchssituationen	44
3.1.2.7	Abhängige Variablen	45
3.1.2.8	Stichprobe	47
3.1.2.9	Versuchsablauf	47
3.1.3	Ergebnisse	48
3.1.3.1	Vorgehen bei der Datenauswertung	48
3.1.3.2	Studienteil A: Reguläre Fahrt	50
3.1.3.3	Studienteil B: Fehlerfall	57
3.1.4	Diskussion	62
3.1.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)	62
3.1.4.2	Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt)	64
3.1.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)	66
3.1.4.4	Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall)	67
3.1.4.5	Limitationen und Ausblick	69
3.2	Studie 2: Zeitpunkt und Informationsgehalt der Situationsankündigung	71
3.2.1	Fragestellung	71
3.2.2	Methodik	73
3.2.2.1	Versuchsumgebung	73
3.2.2.2	Versuchsdesign	73
3.2.2.3	Gestaltung der Fahrzeugautomation	75
3.2.2.4	Mensch-Maschine-Schnittstelle	75
3.2.2.5	Fahrfremde Tätigkeit	77
3.2.2.6	Versuchssituationen	80
3.2.2.7	Abhängige Variablen	82
3.2.2.8	Stichprobe	85

3.2.2.9	Versuchsablauf.....	85
3.2.3	Ergebnisse.....	86
3.2.3.1	Vorgehen bei der Datenauswertung.....	86
3.2.3.2	Studienteil A: Reguläre Fahrt.....	88
3.2.3.3	Studienteil B: Fehlerfall.....	100
3.2.4	Diskussion.....	101
3.2.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)	101
3.2.4.2	Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt).....	103
3.2.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)	106
3.2.4.4	Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall).....	106
3.2.4.5	Limitationen der Studie und Ausblick	107
3.3	Studie 3: Kontinuierliche Anzeige der Restdistanz im automatisierten Modus.....	111
3.3.1	Fragestellung	111
3.3.2	Methodik.....	114
3.3.2.1	Versuchsumgebung	114
3.3.2.2	Versuchsdesign	114
3.3.2.3	Gestaltung der Fahrzeugautomation	117
3.3.2.4	Mensch-Maschine-Schnittstelle	117
3.3.2.5	Fahrfremde Tätigkeit.....	117
3.3.2.6	Versuchssituationen.....	120
3.3.2.7	Abhängige Variablen.....	120
3.3.2.8	Stichprobe.....	122
3.3.2.9	Versuchsablauf.....	123
3.3.3	Ergebnisse.....	124
3.3.3.1	Vorgehen bei der Datenauswertung.....	124
3.3.3.2	Studienteil A: Reguläre Fahrt.....	125
3.3.3.3	Studienteil B: Fehlerfall.....	140
3.3.4	Diskussion.....	141
3.3.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)	141
3.3.4.2	Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt).....	144
3.3.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)	146
3.3.4.4	Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall).....	147

3.3.4.5	Limitationen der Studie und Ausblick	147
4	GENERELLE DISKUSSION	150
4.1	Unterstützung des Aufgabenwechsels zum manuellen Fahren.....	152
4.2	Unterstützung der Unterbrechung von fahrfremden Tätigkeiten	155
4.3	Auswirkungen von Ankündigungen auf Automationsvertrauen	159
4.4	Generelle Limitationen	162
4.5	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick.....	164
4.6	Praktische Implikationen und Schlussfolgerungen.....	165
5	LITERATURVERZEICHNIS.....	167
6	ANHANG	190

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemdefinition

Technische Fortschritte auf dem Gebiet des automatisierten Fahrens haben in den vergangenen Jahren zur Markteinführung des sogenannten teilautomatisierten Fahrens (SAE Level 2) in Serienfahrzeugen geführt, die den Fahrer¹ gleichzeitig bei der longitudinalen und lateralen Fahrzeugkontrolle unterstützen (siehe Abbildung 1 für eine Übersicht über die Stufen der Automation nach SAE International, 2018). Da diese Systeme jedoch noch nicht in der Lage sind, die Unterstützung in allen Fahrsituationen aufrecht zu erhalten, müssen sie kontinuierlich vom Fahrer überwacht werden. Der Fahrer muss das System im Fall von funktionalen Unzulänglichkeiten, wie beispielsweise einer ungenauen Spurführung, jederzeit übersteuern oder die Kontrolle vollständig übernehmen können, um sicherheitskritische Fahrsituationen zu vermeiden.

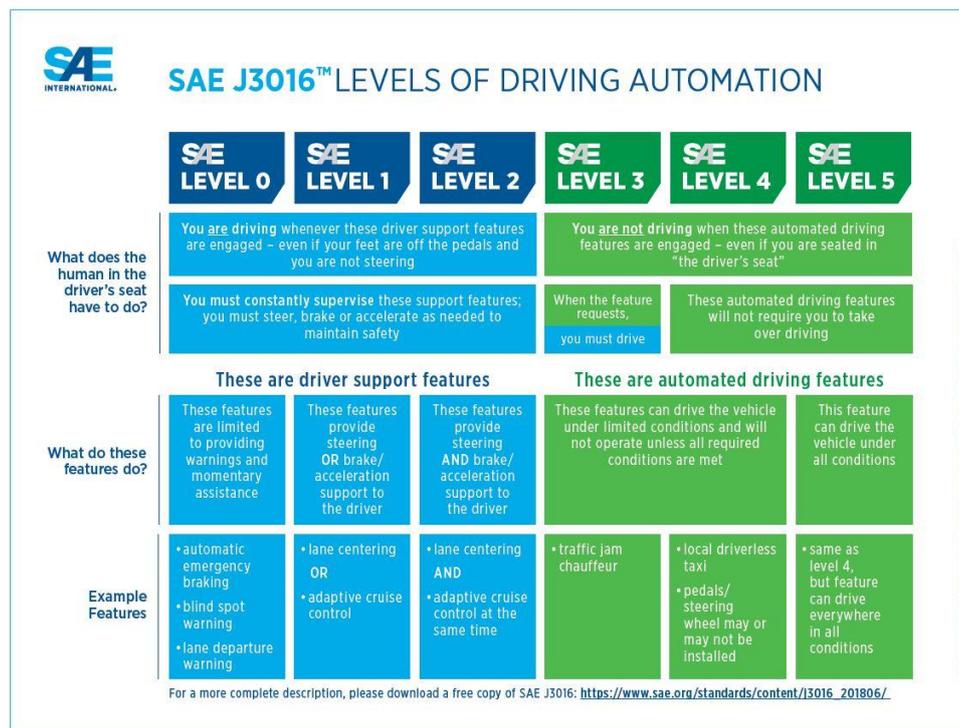


Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Stufen der Automatisierung (Quelle: SAE 2018).

¹ Bei Nennung von Personengruppen wird im Text die männliche Form verwendet. Frauen sowie Personen mit nicht-binärer Geschlechtsidentität sind gleichermaßen angesprochen.

Den nächsten technologischen Entwicklungsschritt stellt die Einführung des hochautomatisierten Fahrens (SAE Level 3) dar, bei dem die Quer- und Längsführung dauerhaft vom Fahrzeug übernommen wird und das System nicht mehr kontinuierlich überwacht werden muss. Am 30. März 2017 wurde vom Bundestag eine Änderung des Straßenverkehrsgesetzes beschlossen, die das hochautomatisierte Fahren auf deutschen Straßen zukünftig ermöglicht (Deutscher Bundestag, 30.03.2017). Dass die internationale Regulatorik für die Zulassung solcher Systeme jedoch noch nicht feststeht (Greis, 02.12.2019), verhindert aktuell die Markteinführung. Derartige Systeme bergen das Potential eines großen individuellen und gesellschaftlichen Nutzens. Neben dem Sicherheitsgewinn durch die Reduktion von auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführenden Unfällen, wird eine Verringerung umweltschädlicher Emissionen durch eine effizientere Fahrweise und einen dadurch bedingten geringeren Kraftstoffverbrauch erwartet (Fagnant & Kockelman, 2015; Kyriakidis, Happee, & de Winter, 2015).

Da der Fahrer hochautomatisierte Systeme nicht mehr kontinuierlich überwachen muss, ist ihm auch die Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten explizit erlaubt, sodass die Fahrtzeit effizient genutzt werden kann. Umfragen mit potentiellen Nutzern der Technologie führen die Möglichkeit zur Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten als einen Hauptvorteil der Nutzung von automatisierten Fahrzeugen an (König & Neumayr, 2017; Naujoks, Wiedemann, & Schömig, 2017). Bereits beim manuellen Fahren ist die Beschäftigung mit nicht-fahrtbezogenen Tätigkeiten wie die Nutzung von Mobiltelefonen weit verbreitet (Cazzulino, Burke, Muller, Arbogast, & Upperman, 2014). Mit zunehmendem Automationsgrad ist von einer weiter steigenden Bereitschaft zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten auszugehen (de Winter, Happee, Martens, & Stanton, 2014). Untersuchungen zu teil- und hochautomatisiertem Fahren im Realverkehr, auf Teststrecken sowie im Fahrsimulator konnten dies bereits mehrfach zeigen (Jamson, Merat, Carsten, & Lai, 2013; Llaneras, Salinger, & Green; Naujoks, Purucker, & Neukum, 2016; Wandtner, Schömig, & Schmidt, 2018b). Das Schreiben von Textnachrichten, Telefonieren oder die Verwendung internetbezogener Anwendungen werden voraussichtlich beliebte Tätigkeiten darstellen (Pfleger, Rang, & Broy, 2016).

Allerdings werden auch hochautomatisierte Fahrzeuge noch an funktionale Systemgrenzen wie beispielsweise Baustellen mit unklarer Linienführung oder schlechte Sichtbedingungen gelangen, die das System nicht selbstständig bewältigen kann (Gold, Naujoks, Radmayr, Bellem, & Jarosch, 2017). In diesen Fällen muss der Fahrer weiterhin als Rückfallebene zur Verfügung stehen und die manuelle Fahrzeugkontrolle übernehmen, wenn er von der Automation durch eine sogenannte Übernahmeaufforderung (engl. *take-over request*, kurz TOR, oder *Request to intervene*, kurz RtI; ISO/TR 21959-1:2018) dazu aufgefordert wird. Eine solche Aufforderung zur manuellen Kontrollübernahme kann kurzfristig (d. h. mit einem zur Reaktion verfügbaren Zeitfenster von wenigen Sekunden) geschehen (Thatcham Research, 2019).

Da mit zunehmender Automatisierung der Fahrzeugkontrolle eine fundamentale Veränderung der Fahrerverantwortung von der aktiven Fahrzeugführung hin zur Pflicht, lediglich für die Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle zur Verfügung zu stehen, einhergeht, stellen Übernahme-situationen beim hochautomatisierten Fahren ein Sicherheitsrisiko dar. Schon in den 1980er Jahren legte Lisanne Bainbridge in ihrem viel beachteten Artikel *Ironies of Automation* dar, dass der Mensch kein geeigneter Überwacher von automatisierten Systemen ist, in denen er keinen oder nur einen geringen aktiven Anteil an den Handlungsprozessen hat (Bainbridge, 1983). Studien aus verschiedenen Anwendungsbereichen der Psychologie wie dem Flugbereich oder der Prozesskontrolle, in denen Automation schon lange ein fester Bestandteil ist, haben solche Situationen vielfach untersucht und dabei ein wiederkehrendes Problemmuster identifiziert: Wird der Nutzer eines automatisierten Systems plötzlich dazu aufgefordert, manuell in das System einzugreifen, beeinflusst dies seine Leistung normalerweise negativ und geht mit einer erhöhten Beanspruchung einher (Merat et al., 2019; Wickens, 1995). Diese sogenannten *out-of-the-loop-unfamiliarity*-Effekte werden in der Regel einem Verlust der Fähigkeiten durch fehlende Übung (Stanton & Marsden, 1996), einem Verlust des Situationsbewusstseins durch die fehlende Beteiligung an den auszuführenden Handlungsschritten (Endsley & Kiris, 1995; Endsley, 1999) oder einem übermäßigen Vertrauen in die Automation und einer damit einhergehenden Vernachlässigung der Überwachungstätigkeit (Parasuraman & Riley, 1997) zugeschrieben (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000).

Inzwischen liegen vermehrt Erkenntnisse aus empirischen Untersuchungen zum Fahrerverhalten während kurzfristiger Übernahme-situationen vor (bspw. Damböck, Farid, Tönert, & Bengler, 2012; Gold, Damböck, Lorenz, & Bengler, 2013; Naujoks, Mai, & Neukum, 2014; Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid, & Bengler, 2014). Der Schwerpunkt dieser Studien lag vorrangig auf der Untersuchung des für eine sichere Übernahme minimal benötigten Zeitbudgets bei der Ausgabe von Übernahmeaufforderungen. Dabei verwendete die Mehrzahl der Studien relativ einfache Mensch-Maschine-Schnittstellen (engl. *human-machine-interface*, kurz HMI), die dem Fahrer lediglich die Notwendigkeit zur Kontrollübernahme kommunizieren. Die Beschäftigung mit einer fahrfremden Tätigkeit wurde vor allem unter dem Aspekt, wie stark unterschiedliche Eigenschaften der Tätigkeit die Übernahmefähigkeit des Fahrers einschränken, betrachtet (Naujoks, Purucker, Wiedemann, & Marberger, 2019; Radlmayr et al., 2014). Nur wenige Autoren untersuchten bislang das Verhalten und die Leistung im Umgang mit einer fahrfremden Tätigkeit, wenn diese durch eine Übernahme während der automatisierten Fahrt unterbrochen wurde (bspw. Naujoks, Forster, Wiedemann, & Neukum, 2017b; Wintersberger, Riener, Schartmüller, Frison, & Weigl, 2018). Es ist jedoch davon auszugehen, dass ungeplante Unterbrechungen durch plötzliche Übernahmen den Fahrer bei der Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten stören und somit einem der Hauptnutzungsgründe für hochautomatisiertes Fahren

entgegenwirken können (Adamczyk & Bailey, 2004). Die Vermeidung unnötiger Unterbrechungen bei der Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten wird neben der sicheren Kontrollübernahme vermutlich einen entscheidenden Einfluss darauf haben, ob hochautomatisiertes Fahren eine komfortable und sichere Erfahrung darstellt und dadurch die Akzeptanz erfährt, die benötigt wird, um flächendeckend eingesetzt zu werden (König & Neumayr, 2017; Kyriakidis et al., 2015; Naujoks, Wiedemann et al., 2017).

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, vor diesem Hintergrund zu untersuchen, wie Fahrer durch eine optimierte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle effektiv bei der Wiedererlangung der Fahrzeugkontrolle an Systemgrenzen und bei der Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt unterstützt werden können, wenn diese wiederholt durch Episoden des manuellen Fahrens unterbrochen werden. Für ein Verständnis der damit verbundenen kognitiven Prozesse und zu erwartenden Schwierigkeiten werden zunächst Erkenntnisse zu Aufgabenwechseln aus dem Bereich der kognitiven Psychologie dargestellt, die auf das hochautomatisierte Fahren übertragen werden können (Kapitel 2.1 „Kognitionspsychologische Grundlagen“). Insbesondere wird auf das Konzept von *Wechsel- und Wiederaufnahmekosten* bei der Unterbrechung laufender Tätigkeiten eingegangen. Um den Unterstützungsbedarf des Fahrers abzuleiten, wird im theoretischen Teil der Arbeit der Prozess der Rückführung des Fahrers von der Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten zur manuellen Fahraufgabe sowie der Prozess der Wiederaufnahme der fahrfremden Tätigkeit nach der Unterbrechung durch die manuelle Fahrt analysiert (Kapitel 2.2 „Übernahmeprozess beim automatisierten Fahren“).

Anschließend wird dargestellt, wie bisher publizierte Übernahmekonzepte vor dem Hintergrund von Aufgabenwechseln zwischen fahrfremder Tätigkeit und manuellem Fahren erweitert werden können, um zu erwartenden negativen Auswirkungen auf die Übernahme der Fahrzeugführung und die Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt entgegenzuwirken (Kapitel 2.3 „Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle“). Lösungsvorschläge werden aus den Erkenntnissen der kognitiven Psychologie und der angewandten Arbeitspsychologie abgeleitet. Darauf aufbauend wird ein prototypisches Anzeigekonzept entwickelt, welches den Fahrer durch frühzeitige Informationen über die Notwendigkeit von unvermeidlichen Unterbrechungen der automatisierten Fahrt durch bevorstehende Systemgrenzen informieren soll. Dadurch erhält er die Möglichkeit, eine ausgeführte Tätigkeit rechtzeitig und selbst-initiiert zu unterbrechen und sich auf die Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle vorzubereiten.

Im empirischen Teil der Arbeit (Kapitel 3) wird das Anzeigekonzept im Rahmen von drei aufeinander aufbauenden Probandenstudien in einem Fahrsimulator evaluiert und iterativ weiterentwickelt. Das **erste Experiment** untersucht, ob Fahrer prinzipiell von frühzeitigen Informationen über bevorstehende Übernahmen durch sogenannte Situationsankündigungen, die zeitlich vor dringlichen Übernahmeaufforderungen ausgegeben werden, profitieren (beispielsweise durch eine verbesserte Übernahmeleistung). Das **zweite Experiment** befasst sich mit der Frage, wie solche Ankündigungen in zeitlicher und inhaltlicher Hinsicht zu gestalten sind (d. h. wann sie präsentiert werden und welche Informationen sie enthalten sollten), und welchen Einfluss die Gestaltung auf die Aufgabenbearbeitung in Annäherung an die Übernahmesituation hat. Um zu untersuchen, wie ein Anzeigekonzept zur längerfristigen Planung von fahrfremden Tätigkeiten während des automatisierten Fahrens beitragen könnte, werden im **dritten Experiment** verschiedene Konzepte frühzeitiger Informationen verglichen. Dabei werden Situationsankündigungen, die vor dem Erreichen einer Übernahmesituation ausgegeben werden, kontinuierlich präsentierten Informationen über die verbleibende Distanz zur nächsten Übernahmesituation gegenübergestellt.

Fahrerassistenzsysteme und Automation können negative Auswirkungen auf die Fahrerreaktion bei Systemausfällen und -fehlern durch ein zu starkes Vertrauen auf die Fahrerunterstützung nach sich ziehen (siehe Kapitel 2.4 „Automationsvertrauen und Systemfehler“). Für eine vollständige Bewertung des untersuchten Anzeigekonzepts sollte deswegen neben der fehlerfreien Systemnutzung auch das Auftreten von **Fehlerfällen** betrachtet werden (RESPONSE Consortium, 2006). Alle drei Studien untersuchen deswegen neben dem jeweiligen Anwendungsfall (d. h. die Untersuchung der Wirksamkeit des erweiterten Anzeigekonzepts) auch Fehler des Anzeigekonzepts, wie etwa das Ausbleiben aller Systemausgaben aufgrund eines stillen Systemausfalls (Studie 1), das Ausbleiben einer Vorankündigung (Studie 2) oder die fehlerhafte Anzeige der verbleibenden Restdistanz im automatisierten Modus (Studie 3).

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Kognitionspsychologische Grundlagen

2.1.1 Vom Multitasking zum Aufgabenwechsel

Die Ausführung nicht-fahrtbezogener Tätigkeiten während des manuellen Fahrens ist weit verbreitet und stellt ein Risiko für die Verkehrssicherheit dar (Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006), da Fahrer ihre Aufmerksamkeit zwischen der Hauptaufgabe der Fahrzeugführung (*primary task*) und der Nebentätigkeit (*secondary task*) teilen müssen (Blanco, Bieber, Gallagher, & Dingus, 2006; Strayer, Watson, & Drews, 2011). Diese Situation wird als *concurrent multitasking* (Salvucci, Taatgen, & Borst, 2009) bzw. *dual tasking* (Strayer & Johnston, 2001) bezeichnet. Da der Fahrer während des hochautomatisierten Fahrens allerdings nicht mehr selbst für die Fahrzeugführung zuständig ist, verändert sich die oft verwendete Einteilung von *primary* und *secondary task*. In Zukunft kann die fahrfremde Tätigkeit als primäre Aufgabe des Fahrers während einer hochautomatisierten Fahrt angesehen werden, die durch die Notwendigkeit zur Übernahme der manuellen Fahrzeugführung unterbrochen wird (Naujoks, Wiedemann et al., 2017; van der Heiden, Iqbal, & Janssen, 2017; Wintersberger, Riener et al., 2018). Aus psychologischer Sicht stellt die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung beim hochautomatisierten Fahren einen Aufgabenwechsel dar. Aus *Multitasking* wird somit eine sequentielle Ausführung von Aufgaben (Lorenz, Kerschbaum, Hergeth, Gold, & Radlmayr, 2015; Salvucci et al., 2009).

Während beim manuellen Fahren aufgrund des Risikos für die Verkehrssicherheit im Allgemeinen nur die Ausführung von Aufgaben zulässig ist, die kurze Blickabwendungen erfordern (Alliance of Automobile Manufacturers, 2006; NHTSA, 2013), sind beim hochautomatisierten Fahren weitaus komplexere Tätigkeiten möglich. Damit verändert sich auch die Rolle der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Während sie beim manuellen Fahren ein möglichst geringes Ablenkungspotential von der Primäraufgabe darstellen sollte (Alliance of Automobile Manufacturers, 2006; NHTSA, 2013), kommt ihr beim hochautomatisierten Fahren unter anderem die Aufgabe zu, einen einfachen und effizienten Wechsel zwischen der fahrfremden Tätigkeit und dem manuellen Fahren zu unterstützen (Naujoks, Wiedemann et al., 2017). Das folgende Kapitel beschreibt die kognitiven Grundlagen von Aufgabenwechseln, um die zu erwartenden Schwierigkeiten beim hochautomatisierten Fahren aufzuzeigen.

2.1.2 Wechsel- und Wiederaufnahmekosten

Aufgabenwechsel und -unterbrechungen sowie deren Auswirkungen auf die Aufgabenleistung haben in der Vergangenheit großes Interesse in der Grundlagen- und arbeitspsychologischen Forschung hervorgerufen. Wie im Rahmen empirischer Studien vielfach gezeigt werden konnte, sind Wechsel zwischen unterschiedlichen Aufgaben typischerweise mit Leistungseinbußen – üblicherweise in Form von verlängerten Reaktionszeiten und höheren Fehlerraten – verbunden. Diese werden als *Wechselkosten* (engl. *switch costs*) bezeichnet (Kiesel, 2010). Im Bereich der kognitiven Psychologie werden Leistungseinbußen beobachtet, wenn Probanden bei einer Reihe von Experimentalaufgaben nach Abschluss eines Versuchsdurchgangs (engl. *trial*) eine andere Aufgabe als die vorher ausgeführte bearbeiten sollen (sog. *Aufgabenwechsel* oder engl. *task switch*), verglichen damit, wenn dieselbe Tätigkeit erneut ausgeführt wird (sog. *task repetition*; Kiesel et al., 2010). Die Anwendungsforschung hat sich beispielsweise im Bereich der Arbeitspsychologie vor allem mit den Auswirkungen von Unterbrechungen einer über einen längeren Zeitraum kontinuierlich ausgeführten Tätigkeit durch eine andere Aufgabe beschäftigt. Die Zuwendung zur unterbrechenden Tätigkeit (beispielsweise eine im Postfach eingetroffene E-Mail) ist mit einem Zeitverzug verbunden, den Altmann und Trafton (2004b) als *interruption lag* bezeichnen. Andere Autoren sprechen hierbei von der *interruption latency* (Bailey & Konstan, 2006). Wird die unterbrochene Aufgabe wieder aufgenommen, entstehen bei diesem Wechsel sogenannte *Wiederaufnahmekosten* (*resumption cost*; Monk, Boehm-Davis, & Trafton, 2004; Monk, Trafton, & Boehm-Davis, 2008). Diese manifestieren sich in einer Verlängerung der Latenz der Wiederaufnahme der Primärtätigkeit nach der Unterbrechung (Altmann & Trafton, 2004b). Aufgrund dieses Zeitverzugs (engl. *resumption lag*; Trafton, Altmann, Brock, & Mintz, 2003) ist die Gesamtbearbeitungsdauer einer unterbrochenen Aufgabe länger als die einer kontinuierlich ausgeführten Primäraufgabe (Bailey, Konstan, & Carlis, 2001; Kreifeldt & McCarthy). Die Unterbrechung kann auch zu einer erhöhten Fehleranzahl in der Primärtätigkeit oder der unterbrechenden Aufgabe führen (McFarlane, 1999; Latorella, 1996). Als weitere Einschränkung konnte eine Verschlechterung des affektiven Zustands durch Aufgabenunterbrechungen gezeigt werden (Adamczyk & Bailey, 2004; Bailey et al., 2001).

Für die zugrundeliegenden Mechanismen von Wechselkosten werden verschiedene Erklärungsansätze diskutiert. Monsell (2003) führt beispielsweise zeitverbrauchende kognitive Re-Konfigurationsprozesse für das neue Aufgaben-Set² an. Als Re-Konfigurationsprozesse

² Aufgaben-Set wird von Kiesel et al. (2007, S. 850) folgendermaßen definiert: „The term *task set* refers to the organization of cognitive processes and mental representations that enable the person to act in accordance to task requirements. Thus, a task set must include the representation of task-relevant stimuli and task-relevant responses and the corresponding S-R mappings.“

werden in Kiesel et al. (2010) das Setzen neuer Aufgabenziele (*goal-shifting*), die Aktivierung von Stimulus-Reaktions-Assoziationen (*rule-activation*) oder die aufmerksamkeitsbezogene Gewichtung von aufgabenrelevanten Stimuli (*stimulus-set-biasing*) diskutiert (siehe auch Meiran, 2000; Meiran, Chorev, & Sapir, 2000; Monsell, 2003; Monsell, Sumner, & Waters, 2003; Rubinstein, Meyer, & Evans, 2001). Es existieren jedoch ebenfalls empirische Befunde, die eine aufgabenspezifische Vorbereitung als Grund für Wechselkosten in Frage stellen (Altmann & Gray, 2008; Koch, 2005; Mayr & Kliegl, 2003). Die Verschlechterung der Leistung nach einem Aufgabenwechsel wird stattdessen mit einer Interferenz von Gedächtnisprozessen der vorherigen und nachfolgenden Aufgabe erklärt (Kiesel et al., 2010). Bei Beginn einer neuen Aufgabe sind Gedächtnisinhalte (z. B. Reiz-Reaktions-Assoziationen oder Handlungsziele) der vorherigen Aufgabe noch aktiv, wodurch sie unwillkürlich solange mit der Ausführung der neuen Aufgabe interferieren, bis sie nach einer gewissen Zeit verfallen (engl. *decay*, siehe Allport und Wylie, 1999; Altmann, 2002).

Gedächtnisprozesse werden auch als Ursache für die verzögerte Wiederaufnahme nach einer Unterbrechung angeführt. Aufgrund einer plötzlichen Unterbrechung können Aspekte der unterbrochenen Tätigkeit, die für deren Weiterbearbeitung relevant sind, unter Umständen nicht ausreichend memoriert werden. Aus diesem Grund können sie bei der Wiederaufnahme der Tätigkeit nicht sofort oder vollständig abgerufen werden (Li, Blandford, Cairns, & Young, 2008). Wenn man sich an wichtige Handlungsschritte nach einer Unterbrechung nicht erinnert, kann dies besonders in Situationen mit hoher Arbeitsbelastung, wie sie bei der Ausführung komplexer Tätigkeiten entstehen kann, problematisch sein (Grundgeiger, Sanderson, MacDougall, & Venkatesh, 2010; Latorella, 1996; Willett et al., 2018).

Zusammengefasst liefern die Erkenntnisse der Kognitions- und Arbeitspsychologie Hinweise darauf, welche Auswirkungen im Bereich des automatisierten Fahrens durch einen Wechsel (engl. *transition*) zwischen fahrfremder Tätigkeit während der automatisierten Fahrt, dem manuellen Fahren und dem Wechsel zurück zur automatisierten Fahrt zu erwarten sind. Dabei ist jeweils vor allem der Zeitpunkt kurz vor und kurz nach einem Wechsel von Interesse (Janssen, Iqbal, Kun, & Donker, 2019). Zu erwarten sind die folgenden Einschränkungen (siehe Abbildung 2): Wird die fahrfremde Tätigkeit bei einem durch eine Übernahmeaufforderung bedingten fremd-initiierten (d. h. durch die Automation aufgrund der Detektion einer Systemgrenze) Wechsel durch eine Phase des manuellen Fahrens unterbrochen, ist bei der Kontrollübernahme mit einer zeitlichen Verzögerung (*interruption lag*) und einer Einschränkung der Qualität der Fahrzeugkontrolle nach dem Wechsel zu rechnen. Wird die ursprüngliche Aufgabe anschließend, wenn die Automation wieder aktiviert wurde, selbst-initiiert wieder aufgenommen, kann es zu einer erhöhten

Wiederaufnahmezeit (*resumption lag*) und einer erhöhten Fehlerzahl in der fahrfremden Tätigkeit kommen.³

Die Transition zum manuellen Fahren stellt einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar, da durch eine verzögerte Übernahme sicherheitskritische Konsequenzen für den Fahrer und andere Verkehrsteilnehmer entstehen können, beispielsweise wenn Nutzer die Weiterbearbeitung der Tätigkeit gegenüber einer Übernahmeaufforderung priorisieren (Wandtner et al., 2018b). Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit insbesondere der *interruption lag* beim Wechsel zum manuellen Fahren betrachtet. Die Wiederaufnahme der fahrfremden Tätigkeit (*resumption lag*) wird in Studie 2 zusätzlich betrachtet. In den folgenden Kapiteln werden die an der Übernahme beteiligten kognitiv-motorischen Prozesse näher betrachtet, um den Unterstützungsbedarf des Fahrers aufzuzeigen, und empirische Erkenntnisse zu den erwarteten Einschränkungen bei Aufgabenwechseln dargestellt.

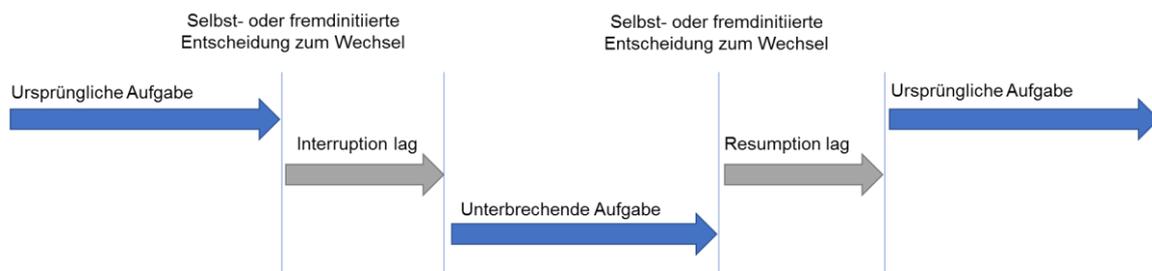


Abbildung 2: Generische Darstellung der Phasen einer Unterbrechung und Wiederaufnahme von Tätigkeiten (abgeleitet von Trafton et al., 2003; Trafton & Monk, 2007).

2.2 Übernahmeprozess beim automatisierten Fahren

Verschiedene Autoren haben den Wechsel zwischen dem automatisierten und dem manuellen Fahren in Phasen eingeteilt, anhand derer die wesentlichen Aufgaben und Anforderungen an den Fahrer illustriert werden können (Janssen et al., 2019; Marberger et al., 2017; Naujoks, Wiedemann et al., 2017; siehe auch McFarlane & Latorella, 2002 für eine allgemeinere Unterteilung der Phasen bei Aufgabenunterbrechungen). Grundsätzlich können die folgenden Phasen unterschieden werden:

1. Hochautomatisierte Fahrt
2. Transition zum manuellen Fahren

³ Wird hingegen das manuelle Fahren weiterhin als Primäraufgabe betrachtet, würde die selbst-initiierte Aufgabenbearbeitung nach einer Aktivierung der Automation die unterbrechende Tätigkeit darstellen. Das manuelle Fahren müsste nach einer Übernahmeaufforderung (fremd-initiiert) wiederaufgenommen werden. In diesem Fall stellt der *resumption lag* den Zeitverzug bis zur Wiederaufnahme der manuellen Kontrolle dar.

3. Manuelle Fahrt
4. Transition zurück zum hochautomatisierten Fahren

Die innerhalb der verschiedenen Phasen beteiligten Prozesse für eine erfolgreiche Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

2.2.1 Hochautomatisierte Fahrt

Während der hochautomatisierten Fahrt darf sich der Fahrer laut dem Straßenverkehrsgesetz (Deutscher Bundestag, 29.03.2017, Änderung 2017, S. 3) „...vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugsteuerung abwenden; dabei muss er derart wahrnehmungsbereit bleiben, dass er seiner Pflicht nach Absatz 2 jederzeit nachkommen kann.“⁴ Bestimmte Fahrerzustände wie Schlafen oder der Einfluss von psychoaktiven Substanzen wären demnach nicht mit der Aufgabe des Fahrers vereinbar. Untersuchungen zeigen, dass eine fehlende Beschäftigung (Neubauer, Matthews, Langheim, & Saxby, 2012) oder eine Beschäftigung mit monotonen Tätigkeiten (Jarosch, Kuhnt, Paradies, & Bengler, 2017) zu einem Zustand von Müdigkeit und Vigilanzminderung (Hancock, 2017) führen und die Übernahmefähigkeit einschränken kann (Radlmayr et al., 2019). Dahingegen haben aktivierende Tätigkeiten in einigen Studien zu einer Steigerung der Übernahmeleistung im Vergleich zu monotonen Tätigkeiten geführt (Jarosch, Bellem, & Bengler, 2019; vgl. Atchley & Chan, 2011, für Befunde beim manuellen Fahren). Wenn die Beschäftigung mit einer Tätigkeit jedoch mit einer starken Abwendung von der Verkehrssituation verbunden ist, kann dies die Übernahmefähigkeit ebenfalls einschränken, da Fahrer im Moment der Übernahmeaufforderung über kein adäquates Situationsbewusstsein verfügen (Vogelpohl, Kühn, Hummel, Gehlert, & Vollrath, 2018). Unter Situationsbewusstsein versteht Endsley (1988; übersetzt von Rauch, 2009, S. 3) das „...Wahrnehmen von Elementen innerhalb einer dynamischen Umgebung, das Verstehen der Bedeutung dieser Elemente und die Antizipation deren Zustände in der nahen Zukunft.“ Zusammengefasst kann während der automatisierten Fahrt sowohl eine Unterforderung durch Untätigkeit als auch eine zu starke Beanspruchung durch fahrfremde Tätigkeiten die Übernahmefähigkeit des Fahrers negativ beeinflussen (May & Baldwin, 2009).

⁴ Absatz 2 beschreibt die Pflicht, im Falle einer Übernahmeaufforderung oder anderer Umstände die Fahrzeugkontrolle unverzüglich zu übernehmen.

2.2.2 Transition zum manuellen Fahren

Für eine erfolgreiche system-initiierte (d. h. durch die Automation aufgrund einer Systemgrenze initiierte) Transition zum manuellen Fahren muss der Fahrer die Übernahmeaufforderung bemerken, eine ausgeführte fahrfremde Tätigkeit unterbrechen, die Verkehrssituation analysieren, die notwendigen Handlungsschritte zur Ausführung der Fahraufgabe ableiten und diese in adäquates Verhalten umsetzen (Naujoks, Befein, Wiedemann, & Neukum, 2018). Aufgabenwechsel zurück zum manuellen Fahren erfordern laut Marberger et al. (2017) eine Re-Konfiguration des *sensorischen, kognitiven und motorischen* Zustands des Fahrers, der sich unter Umständen längere Zeit nicht mit der Fahrumgebung beschäftigt hat. Im Folgenden werden die Re-Konfigurationsprozesse nach der Unterscheidung von Marberger et al. (2017) genauer beschrieben.

Im Rahmen der *sensorischen Re-Konfiguration* muss der Fahrer zunächst die Übernahmeaufforderung bemerken, um die Notwendigkeit zur Kontrollübernahme ableiten zu können. Zur effektiven Kommunikation des Übernahmeerfordernisses sollten Übernahmeaufforderungen immer multimodal gestaltet sein (bspw. Naujoks et al., 2014; Politis, Brewster, & Pollick, 2017). Dies ist vor allem dann relevant, wenn die Modalität der ausgeführten Tätigkeit durch die Beanspruchung gleicher Ressourcen mit der Wahrnehmung der Übernahmeaufforderung interferiert (Wandtner, Schömig, & Schmidt, 2018a; Wickens, 2002). Beispielsweise schränken visuelle Tätigkeiten die Übernahmeleistung stärker ein als auditive Tätigkeiten, wenn die Übernahmeaufforderung visuell-auditiv präsentiert wird (Wandtner et al., 2018a). Zur Erfassung der Fahrsituation wird die Aufmerksamkeit durch eine Serie von Blickzuwendungen auf relevante Elemente der Fahrsituation gelenkt (Janssen et al., 2019; Marberger et al., 2017).

In einem nächsten Schritt erfolgt die *kognitive Verarbeitung* der zur Verfügung stehenden Information (Lu, Coster, & de Winter, 2017; Zhang, de Winter, Varotto, Happee, & Martens, 2019). Die Wiedererlangung des Situationsbewusstseins (*situation awareness recovery*; Gartenberg, Breslow, McCurry, & Trafton, 2014) wird von mehreren Autoren als zentral für eine erfolgreiche Übernahme der Fahrzeugführung angesehen (Lu et al., 2017; Vlakoveld, van Nes, Bruin, Vissers, & van der Kroft, 2018; Vogelpohl, Gehlmann, & Vollrath, 2019). Zur Wiedererlangung des Situationsbewusstseins müssen Fahrer die aktuelle Fahrsituation erfassen (siehe „sensorische Re-Konfiguration“) und deren wahrscheinlichen Fortgang antizipieren. Dazu werden Informationen über die aktuelle Fahrsituationen zu einem Gesamtbild integriert und notwendige Handlungsschritte wie das erforderliche Fahrmanöver zur Lösung der Situation abgeleitet (Zhang, Wilschut, Willemsen, & Martens, 2019). Dabei kann es insbesondere dann zu Handlungsfehlern kommen, wenn nicht genügend Zeit für den Aufbau von Situationsbewusstsein

zur Verfügung steht. Gold, Damböck und Lorenz et al. (2013) berichten davon, dass Fahrer sich mit der Übernahme mehr Zeit lassen und mehr Spiegelblicke durchführen, wenn ihnen mehr Zeit für die Übernahme zur Verfügung steht. Auch Vlakveld et al. (2018) konnten beobachten, dass Fahrer nach der Übernahme der Fahrzeugkontrolle umso mehr auf kritische Elemente in der Fahrsituation blickten, je mehr Zeit ihnen zur Wiederherstellung des Situationsbewusstseins vor der Übernahme der Fahrzeugführung gegeben wurde (vgl. Samuel, Borowsky, Zilberstein, & Fisher, 2016).

Eine Verbindung der theoretischen Konstrukte des Wiederaufbaus von Situationsbewusstsein beim Wechsel zum manuellen Fahren und Aufgabenwechseln im Kontext der kognitiven Psychologie stellt die *memory-for-goals* Theorie von Altmann und Trafton (2002a) dar (Gartenberg et al., 2014). Durch die Theorie lassen sich Annahmen darüber treffen, wie die Wiedererlangung von Situationsbewusstsein bei der Übernahme der Fahrzeugführung beeinflusst werden kann (Vlakveld et al., 2018). Um eine unterbrochene Aufgabe fortzusetzen (in diesem Fall das manuelle Fahren wiederaufzunehmen), muss der mentale Kontext der Aufgabe vor der Unterbrechung aus dem Gedächtnis rekonstruiert werden, was eine Aktivierung des entsprechenden Handlungsziels beinhaltet (Gartenberg et al., 2014). Wie Vlakveld et al. (2018, S. 918) zusammenfassen, ist die Zielaktivierung beim Aufgabenwechsel entsprechend der *memory-for-goals* Theorie von (1) der Länge der unterbrechenden Aufgabe (in diesem Fall die fahrfremde Tätigkeit), (2) der Komplexität der unterbrechenden Aufgabe und (3) der Verfügbarkeit von Hinweisreizen (*retrieval cues*) zur Reaktivierung des Ziels abhängig. Je länger der Nutzer sich von der Fahraufgabe abgewandt hat und je beanspruchender die fahrfremde Tätigkeit ist, desto stärker sollten Gedächtnisspuren der unterbrochenen Aufgabe (in diesem Fall des manuellen Fahrens) verfallen sein und desto länger sollte die Wiedererlangung des Situationsbewusstseins dauern (Gartenberg et al., 2014). Außerdem ist zu erwarten, dass Fahrer ihre Aufmerksamkeit zunächst auf solche Elemente der Fahrsituation richten, die mit dem Fahrkontext vor der automatisierten Fahrt übereinstimmen (*retrieval cues*), bevor sie sich neuen Elementen der Fahrsituation zuwenden (Gartenberg et al., 2014; Vlakveld et al., 2018).

Neben der kognitiven Vorbereitung auf die Fahraufgabe muss auch die fahrfremde Tätigkeit unterbrochen werden. Auch hierbei spielen sich kognitive Prozesse ab, die für deren spätere Wiederaufnahme entscheidend sind. Um eine vor der Übernahme nicht vollständig abgeschlossene fahrfremde Tätigkeit nach der Unterbrechung leicht wieder aufnehmen zu können, müssen Inhalte der Aufgabe im Gedächtnis repräsentiert werden (Salvucci et al., 2009; *cognitive suspension of side activity*, siehe Wintersberger, Green, & Riener, 2017). In dieser Phase kann es deshalb zu einem sprunghaften Anstieg der kognitiven Beanspruchung kommen, da mehrere Informationen über die Fahrsituation und die fahrfremde Tätigkeit im

Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden müssen (Liu, Wadeson, Kim, & Nam, 2016). Dies kann sich letztlich negativ auf die spätere Ausführung der Fahraufgabe auswirken.

Letztlich muss zur Wiederaufnahme der manuellen Fahrzeugführung die **motorische Re-Konfiguration** erfolgen (Zhang et al., 2019). Dies beinhaltet eine (Re-)positionierung von Händen und Füßen und die Wiederherstellung einer adäquaten Sitzposition (Wintersberger, Green et al., 2017; Zhang et al., 2019). Die motorische Vorbereitung kann durch die Art der ausgeführten Tätigkeit erschwert werden, wenn in der Hand gehaltene Gegenstände erst beiseitegelegt werden müssen (bspw. Naujoks et al., 2019; Wandtner et al., 2018a). Je nach Funktionsgestaltung der Automation muss der Fahrer die Automation – beispielsweise durch das Betätigen einer Lenkradtaste (Forster, Hergeth, Naujoks, Krems, & Keinath, 2019) – aktiv deaktivieren.

Da die beteiligten sensorischen, kognitiven und motorischen Prozesse zeitverbrauchend sind (Marberger et al., 2017), werden beim Prozess der manuellen Kontrollübernahme die bei Aufgabenwechseln typischerweise auftretenden Wechselkosten erwartet. Langsamere Reaktionen auf Verkehrereignisse beim automatisierten Fahren im Vergleich zu einer manuellen Fahrt werden von Gold, Damböck und Bengler (2013) sowie Vogelpohl et al. (2018) bzw. Kühn, Vogelpohl und Vollrath (2017) berichtet. Eriksson und Stanton (2017b) fassen in einem Review die Übernahmezeiten aus insgesamt 25 empirischen Studien zusammen, die den Fahrern ein verfügbares Zeitfenster zur Übernahme von 0-30 Sekunden (Mittelwert: 6.37 s) zur Verfügung stellen. Dabei liegen die Übernahmezeiten zwischen ca. 1 und 15 Sekunden (Mittelwert: 2.96 s). Eine Meta-Analyse über 129 Studien von Zhang et al. (2019) zeigt Übernahmezeiten im Bereich von 0.69 bis 19.79 Sekunden mit einem Mittelwert von 2.72 Sekunden auf, wobei 70% der Daten im Bereich von 5 bis 7 Sekunden liegen (Lu et al., 2019). Die berichteten Reaktionszeiten sind damit fast viermal so lang wie Bremsreaktionszeiten beim manuellen Fahren auf erwartete Ereignisse (0.7 s) und nahezu doppelt so lang wie Reaktionszeiten auf vollkommen überraschende Situationen (1.5 s; Green, 2000).

In empirischen Studien wurden unterschiedliche Einflussfaktoren auf Übernahmezeiten untersucht, welche die in diesem Kapitel beschriebenen Re-Konfigurationsprozesse erschweren können. Eine Reihe von Studien weist beispielsweise auf eine Verlängerung der Übernahmezeit hin, wenn sich Fahrer während der automatisierten Fahrt mit fahrfremden Tätigkeiten beschäftigen (Eriksson & Stanton, 2017b; Zeeb, Härtel, Buchner, & Schrauf, 2017). Je nach Art der Tätigkeit kann diese die sensorischen, kognitiven oder motorischen Re-Konfigurationsprozesse unterschiedlich stark beeinflussen. Auch eine hohe Motivation zur Aufgabenbearbeitung kann dazu führen, dass sich die Fahrer bei einem Übernahmeerfordernis verzögert von der fahrfremden Tätigkeit lösen (Rauffet, Botzer, Chauvin, Saïd, & Tordet, 2019), was die Re-Konfiguration auf das manuelle Fahren zusätzlich erschwert. Auch die Modalität der

Übernahmeaufforderung spielt eine entscheidende Rolle im Übernahmeprozess. Visuell-auditive Übernahmeaufforderungen führen verglichen mit rein visuellen Übernahmeaufforderungen zu einer geringeren Übernahmezeit (Naujoks et al., 2014; siehe auch Petermeijer, Doubek, & de Winter, 2017; Yoon, Kim, & Ji, 2019), was mit einer Beschleunigung der sensorischen Re-Konfiguration erklärt werden kann. Die Meta-Analyse von Zhang et al. (2019) bestätigt, dass es sich bei der Komplexität der fahrfremden Tätigkeit (insbesondere, ob Gegenstände in der Hand gehalten wurden, was eine motorische Re-Konfiguration erschwerte) und der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (insbesondere die Modalität der Übernahmeaufforderung) um Haupteinflussfaktoren auf die Übernahmezeit handelt. Neben diesen Faktoren erwiesen sich die fehlende Erfahrung mit Übernahmesituationen und das zur Verfügung stehende Zeitbudget als wichtige Einflussgrößen der Übernahmezeit (Zhang et al., 2019).

2.2.3 Manuelle Fahrt

Sobald die Transition zum manuellen Fahren abgeschlossen ist (d. h. sobald die Automation deaktiviert ist), besteht die Hauptaufgabe des Fahrers in der Gewährleistung der sicheren Fahrzeugführung. Je nach Fahrsituation müssen die notwendigen fahrtbezogenen Handlungen wie die Durchführung eines Fahrmanövers oder die Stabilisierung des Fahrzeugs umgesetzt werden (Zhang et al., 2019).

Wechselkosten können sich neben den unter Kapitel 2.2.2 („Transition zum manuellen Fahren“) beschriebenen erhöhten Reaktionszeiten auch in Leistungseinbußen bei der Übernahme der Fahrzeugkontrolle zeigen. Studien zur Untersuchung der Übernahmequalität zeigen beispielsweise eine Verschlechterung der lateralen Fahrzeugführung gegenüber dem manuellen Fahren direkt nach der Übernahme (Dogan et al., 2017; Naujoks et al., 2019). Damböck et al. (2012) beobachten bei kurzfristigen Übernahmesituationen eine erhöhte Anzahl von Handlungsfehlern bei Spurwechselszenarien (z. B. späte oder ausgelassene Spurwechsel) im Vergleich zu einer manuellen Fahrt, während Gold, Damböck und Lorenz et al. (2013) mehr unnötige Bremsmanöver feststellen. Mehrere Studien berichten von einem nach der Übernahme benötigten Zeitrahmen zwischen 10 und 40 Sekunden, bis die Qualität der lateralen Kontrolle der Fahrzeugführung wieder mit der kontinuierlichen manuellen Fahrzeugführung vergleichbar ist (Merat, Jamson, Lai, Daly, & Carsten, 2014; Naujoks et al., 2019; Pampel et al., 2019). Aus theoretischer Sicht existieren mehrere Erklärungsansätze für diese Leistungseinbußen:

- (1) Der Wechsel des Aufgaben-Sets ist noch nicht vollständig erfolgt (siehe Meiran, 2000; beispielsweise wenn der Fahrer bei der Übernahme der Fahrzeugführung ein auszuführendes Manöver noch nicht geplant hat).

- (2) Das alte Aufgaben-Set der fahrfremden Tätigkeit ist noch aktiv und interferiert mit dem Fahren (siehe Altmann, 2002; beispielsweise wenn zwischen der Unterbrechung der Aufgabe und der Übernahme der Fahrzeugkontrolle nicht genügend Zeit zum Verfall der mit der Tätigkeit assoziierten Gedächtnisspuren liegt).
- (3) Inhalte der unterbrochenen fahrfremden Tätigkeit müssen aktiv im Gedächtnis gehalten werden, um die Aufgabe später fortsetzen zu können und interferieren mit dem Fahren (siehe Engström, Markkula, Victor und Merat, 2017; beispielsweise wenn der Fahrer sich den Inhalt eines Gesprächs merken muss, um dieses nach der Phase der manuellen Fahrt fortführen zu können).

Die Übernahmequalität verbessert sich, je länger das zur Übernahme zur Verfügung stehende Zeitfenster im Vorfeld der Übernahme ist (siehe Abschnitt 2.2.2 „Transition zum manuellen Fahren“; Damböck et al., 2012; Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013). Dies kann damit erklärt werden, dass die erforderlichen Re-Konfigurationsprozesse eine gewisse Zeit brauchen, um erfolgreich abgeschlossen werden zu können. Als unteres Ende des Zeitbudgets einer kurzfristigen Übernahmeaufforderung, welches gerade noch für eine sichere Übernahme der Fahrzeugführung in einfachen Verkehrsszenarien ausreicht, nehmen Damböck et al. (2012) 4 Sekunden an. Gerade in komplexeren Situationen können solche kurzfristigen Zeitfenster jedoch zu nicht-erfolgreichen Übernahmen führen (Mok, Johns, Miller, & Ju, 2017; Naujoks et al., 2014). Vor dem Hintergrund diverser Studien sollte ein Zeitfenster von mindestens 7-10 Sekunden vor Erreichen einer Systemgrenze für eine sichere Übernahme zur Verfügung gestellt werden (Lu et al., 2017; Melcher, Rauh, Diederichs, Widloither, & Bauer, 2015; Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr, & Mergl, 2013).

2.2.4 Transition zurück zum hochautomatisierten Fahren

Sobald die Systemgrenze des automatisierten Fahrzeugs überwunden ist (z. B. Durchfahren einer Baustelle, Streckenabschnitt mit fehlenden Fahrbahnmarkierungen, etc.), kann der Fahrer die Fahrzeugkontrolle wieder an die Automation abgeben und die zuvor unterbrochene Tätigkeit weiterbearbeiten. Dies stellt einen erneuten Aufgabenwechsel dar, bei dem die vorher unterbrochene fahrfremde Tätigkeit wieder zur Primäraufgabe wird (Janssen et al., 2019). Der Wechsel zurück zur Aufgabe kann vor allem dann problematisch sein, wenn diese zuvor ohne die Möglichkeit zur Vorbereitung, beispielsweise durch eine Repräsentation der Aufgabeninhalte im Gedächtnis, bei einem plötzlichen Übernahmeerfordernis unterbrochen wurde (Naujoks, Wiedemann et al., 2017; Traflet et al., 2003). Liegen während der Wiederaufnahme der Tätigkeit keine Hinweise oder Orientierungsmöglichkeiten dafür vor, an welcher Stelle die Aufgabe unterbrochen wurde und welche Handlungsschritte als nächstes notwendig sind, kann dies zu

einer Steigerung von Wechselkosten bei der Wiederaufnahme der fahrfremden Tätigkeit führen (Altmann & Trafton, 2004b).

2.3 Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Analyse des Übernahmeprozesses in den vorangegangenen Kapiteln zeigt den Unterstützungsbedarf des Fahrers bei der Rückführung in die manuelle Fahrzeugführung an mehreren Stellen auf. Dies betrifft in erster Linie den Aufbau von Situationsbewusstsein, um Wechselkosten bei der Übernahme der Fahrzeugführung zu vermeiden. Auch eine Unterstützung bei der Unterbrechung der ausgeführten fahrfremden Tätigkeit zur Vermeidung von Kosten bei der späteren Wiederaufnahme erscheint sinnvoll, um den Vorteil des automatisierten Fahrens, die Fahrzeit produktiv nutzen zu können, ausschöpfen zu können. Diese beiden Ziele können sich jedoch auch entgegenstehen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine schnelle Unterbrechung der Aufgabe zwar der Übernahme zuträglich ist, da für die Vorbereitung der Übernahme der Fahrzeugkontrolle mehr Zeit zur Verfügung steht, jedoch zu Lasten des Erfolgs in der fahrfremden Tätigkeit (und deren späterer Wiederaufnahme) geht, da nicht genug Zeit für die Repräsentation der Inhalte im Gedächtnis zur Verfügung steht. Andererseits kann eine verlängerte Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit die zur Verfügung stehende Zeit zur Übernahme reduzieren und dadurch die Übernahmeleistung einschränken.

Bisherige Ansätze der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die in der Regel auf der Annahme einer beschränkten Reichweite der Fahrzeugsensorik beruhen, verfolgen mehrheitlich den Ansatz, den Fahrer möglichst schnell zur Übernahme der manuellen Fahraufgabe zu bringen. Für eine produktive Mobilität sollte die Mensch-Maschine-Schnittstelle jedoch auch die Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit berücksichtigen. Das Ziel dieser Arbeit ist es deswegen, eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zu entwickeln, die den Fahrer neben einer sicheren Übernahme auch bei der Bearbeitung, Unterbrechung und Wiederaufnahme von fahrfremden Tätigkeiten unterstützt. Um den Nutzer ganzheitlicher beim Aufgabenwechsel unterstützen zu können, sollen bisherige Ansätze der Mensch-Maschine-Schnittstelle in dieser Arbeit um die folgenden Aspekte erweitert werden.

1. Bereitstellung frühzeitiger Informationen über die Notwendigkeit zur Übernahme:

Idealerweise sollten Nutzer hochautomatisierter Fahrzeuge den Wechsel zum manuellen Fahren vorbereiten können, indem sie frühzeitig bei der Wiederherstellung des Situationsbewusstseins und einer selbstregulierten Aufgabenunterbrechung unterstützt werden. Künftig ist davon auszugehen, dass Systemgrenzen durch technische Fortschritte im Bereich des vernetzten Fahrens (bspw. Kommunikation zwischen Fahrzeugen und

Infrastruktur-Sensorik; Seeliger et al., 2014) deutlich frühzeitiger kommuniziert werden können, als dies aufgrund der bordeigenen Sensorik (z. B. Radar oder Kamera) aktuell möglich ist (Eriksson & Stanton, 2017b; Guanetti, Kim, & Borrelli, 2018). Auch ortsfeste Systemgrenzen wie beispielsweise Baustellen können aufgrund der Genauigkeit von GPS-basierten Kartendiensten wie Google Maps™ weit vor deren Erreichen angezeigt werden (Eriksson & Stanton, 2017b). Weiterhin wird das Ende der sogenannten *Operational Design Domain*⁵ (SAE International, 2018; z. B. Abfahrten von Autobahnen) einen häufigen Use Case darstellen, der schon bei Fahrtantritt bekannt sein wird (siehe auch Gold, Naujoks et al., 2017; Wintersberger, Green et al., 2017). In den empirischen Studien wird der Frage nachgegangen, ob die durch solche Entwicklungen ermöglichten frühzeitigen Informationen positive Auswirkungen auf den Wechsel zwischen dem automatisierten und dem manuellen Fahren haben werden und zu welchem Zeitpunkt vor Erreichen der Systemgrenze solche Vorinformationen idealerweise präsentiert werden sollen.

2. **Permanente Anzeige der verbleibenden Restdistanz im automatisierten Modus:** Eine frühzeitige Ankündigung einer bevorstehenden Übernahmesituation, die bei einer definierten Distanz zur Systemgrenze ausgegeben wird, kann vorwiegend die selbstregulierte Unterbrechung einer gerade ausgeführten fahrfremden Tätigkeit unterstützen. Dahingegen könnte eine permanente Anzeige der verbleibenden Restdistanz im automatisierten Modus eine längerfristige Planung fahrfremder Tätigkeiten ermöglichen. So könnten fahrfremde Tätigkeiten entsprechend der Länge der verbleibenden Zeit im automatisierten Modus ausgewählt werden. Wenn Aufgaben rechtzeitig vor einer Übernahme abgeschlossen werden, ließe sich eine Unterbrechung der Aufgabe vollständig verhindern. In den empirischen Studien werden diese beiden Möglichkeiten der Restdistanzanzeige gegenübergestellt.
3. **Spezifische Vorinformationen:** Vorinformationen sollten neben dem Hinweis, *dass* die Fahrzeugkontrolle übernommen werden muss, zusätzliche Informationen bereitstellen, die dem Fahrer eine schnelle und vollständige Herstellung des Situationsbewusstseins ermöglichen. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, welche zusätzlichen Informationen für die Nutzer automatisierter Fahrzeuge relevant sind. Hierbei kommen Informationen wie der Grund der Systemgrenze oder das auszuführende Manöver nach Übernahme der Fahrzeugkontrolle in Frage. Deshalb wird auch dieser Aspekt in den empirischen Studien thematisiert.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die genannten Maßnahmen theoretisch begründet und genauer beschrieben. Grundlage für die Bereitstellung frühzeitiger Vorinformationen sind hierbei

⁵ Diese bezeichnet den Einsatzbereich der Fahrzeugautomation. Dieser kann an bestimmte Geschwindigkeiten oder Streckenbedingungen geknüpft sein.

positive Auswirkungen der im Bereich der kognitiven Psychologie gefundenen Vorbereitungseffekte bei Aufgabenwechseln. Die Frage, wie dem Fahrer die verbleibende Restdistanz vermittelt werden sollte, wird vor dem Hintergrund diskutiert, zu welchem Zeitpunkt Vorinformationen präsentiert werden sollten, um den taktischen und strategischen Umgang mit fahrfremden Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt zu unterstützen. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse zu spezifischen Hinweisreizen im Bereich der kognitiven Psychologie und bei Fahrerwarnungen ab. In allen Unterkapiteln werden bereits vorhandene Erkenntnisse aus empirischen Studien im Bereich des automatisierten Fahrens integriert.

2.3.1 Bereitstellung frühzeitiger Informationen über die Notwendigkeit zur Übernahme

2.3.1.1 Vorbereiten der Übernahme

Die angewandte Kognitionsforschung beschäftigt sich schon seit längerem mit der Frage, wie unvermeidbare Unterbrechungen von Tätigkeiten geringere negative Auswirkungen haben können (sog. *Interruption Management*, vgl. Bailey & Iqbal, 2008; Naujoks, Wiedemann et al., 2017). Wechselkosten können im Allgemeinen durch kognitive Prozesse der Vorbereitung auf die kommende Aufgabe verringert werden (Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003; Traflet et al., 2003). Um den Probanden die Möglichkeit zur Vorbereitung auf die kommende Aufgabe zu geben, wird die Notwendigkeit zum Aufgabenwechsel in Grundlagenstudien häufig durch ein Signal angekündigt, bevor der Wechsel zwischen den Aufgaben tatsächlich vollzogen wird (Monsell, 2003).

Werden Übernahmeaufforderungen sehr kurzfristig gegeben, sodass Fahrer augenblicklich reagieren müssen (bspw. Naujoks et al., 2014), steht nur ein geringes Zeitfenster zur Vorbereitung zur Verfügung. Aus theoretischer Perspektive sollte die Bereitstellung von frühzeitigen Informationen über die Übernahmenotwendigkeit die Möglichkeit zur kognitiven Vorbereitung bieten, wodurch sich vor allem die Übernahmequalität verbessern sollte. Im Kontext von Aufgabenwechseln konnte die Reduktion von Wechselkosten mit steigendem *cue-stimulus interval* (CSI) gezeigt werden (Altmann, 2004; Meiran, 1996). Bezogen auf Übernahmesituationen ist demnach anzunehmen, dass ein ideales Zeitfenster für die Präsentation von Vorinformationen definiert werden kann, was genügend Zeit für die erforderlichen Re-Konfigurationsprozesse bietet. Das Zeitfenster von Vorinformationen ist Teil der empirischen Untersuchung dieser Arbeit (Studie 2 und 3) und wird in Kapitel 2.3.2 („Zeitpunkt der Vorinformation“) in Bezug auf die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten näher betrachtet.

2.3.1.2 Vorbereitung der Unterbrechung fahrfremder Tätigkeiten

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, können Wechselkosten in Bezug auf die Fahraufgabe auch mit der Interferenz mit der gerade noch ausgeführten Aufgabe erklärt werden (Kiesel et al., 2010). Hierbei wird davon ausgegangen, dass Informationen über die vorher bearbeitete Aufgabe noch eine Zeit lang im Gedächtnis präsent sind und mit den kognitiven Prozessen, die mit dem Wechsel zur manuellen Fahraufgabe verbunden sind, interferieren (Altmann & Gray, 2008; Altmann & Trafton, 2002a; Borst, Taatgen, & van Rijn, 2015). Beispielsweise ließen sich Wechselkosten durch eine zunehmende Zeit zwischen dem Beenden der vorherigen Aufgabe und dem Beginn der nächsten Aufgabe (*response-stimulus interval*) verringern (Kiesel et al., 2010). Vor diesem Hintergrund kann angenommen werden, dass sich die Interferenz von Gedächtnisinhalten zwischen der fahrfremden Tätigkeit und der manuellen Fahraufgabe durch eine erhöhte Zeitspanne zwischen der Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit und der Aufnahme der Fahraufgabe reduzieren lässt.

Es wird weiterhin angenommen, dass die Reduzierung der Menge an Aufgabeninhalten im Arbeitsgedächtnis zum Unterbrechungszeitpunkt der Aufgabe Wechselkosten in Bezug auf die Fahraufgabe verringern kann. Dies kann beispielsweise durch die Wahl eines geeigneten Unterbrechungszeitpunkts der Aufgabe geschehen. Bailey und Iqbal (2008) schlagen vor, die Unterbrechung von Aufgaben bis an die Grenzen zwischen Teilaufgaben (*subtasks boundaries*) zu verschieben, da dort die Beanspruchung im Allgemeinen geringer ist als während der Aufgabenausführung. Eine Erklärung liefert die *multiple Ressourcentheorie* von Wickens (2002). Die für eine (Teil-)Aufgabe benötigten Aufmerksamkeitsressourcen werden nach deren Abschluss frei, so dass anschließend mehr kognitive Ressourcen für die nachfolgende Aufgabe zur Verfügung stehen (Bailey & Iqbal, 2008). Die Bearbeitung von Nebenaufgaben bis zum Ende einer Teilaufgabe (z. B. das Tippen von *chunks* beim Eingeben einer Telefonnummer) wurde beispielsweise beim manuellen Fahren beobachtet (Brumby, Salvucci, & Howes, 2009; Janssen, Brumby, & Garnett, 2012). Studien aus dem Kontext der Büroarbeit zeigen außerdem, dass Probanden, die den Moment einer Unterbrechung selbst wählen dürfen, die Unterbrechung einer gerade ausgeführten Aufgabe hinauszögern, bis sie Momente mit geringerem Workload erreichen (Salvucci & Bogunovich, 2010). Dies steht im Einklang mit Ergebnissen von Arrington und Logan (2005), die zeigen, dass selbstgewählte Aufgabenwechsel die Wechselkosten im Vergleich zu fremd-initiierten Aufgabenwechseln verringern können. Somit wird erwartet, dass sich Wechselkosten durch eine selbst-initiierte Aufgabenunterbrechung zu einem passenden Zeitpunkt, die durch eine frühzeitige Vorinformation ermöglicht werden soll, verringern lassen. Bei Tätigkeiten, die während des automatisierten Fahrens ausgeführt werden können, könnten der Handlungssprung eines Films, das Ende eines Buchkapitels oder das Absenden einer

Textnachricht geeignete Unterbrechungszeitpunkte darstellen (Wintersberger, Riener et al., 2018).

Viele Studien weisen darauf hin, dass der Zeitpunkt der Unterbrechung auch eine zentrale Rolle bei der späteren Wiederaufnahme der Aufgabe spielt (Bailey & Iqbal, 2008; Bailey & Konstan, 2006; Czerwinski, Cutrell, & Horvitz, 2000; Monk, Boehm-Davis, Mason, & Trafton, 2004; Monk, Boehm-Davis, & Trafton, 2002). Wenn die Aufgabe erst nach Abschluss einer Teilaufgabe im Vergleich zu während der Aufgabenausführung unterbrochen wird, und auf diese Weise keine aufgabenrelevanten Informationen (z. B. über die Stelle der Unterbrechung) aktiv im Gedächtnis gehalten werden müssen, werden geringere Wiederaufnahmezeiten gefunden (Bailey & Konstan, 2006; Iqbal & Bailey, 2005; van der Heiden et al., 2017). Falls eine Unterbrechung zu einem geeigneten Zeitpunkt beispielsweise aufgrund der Aufgabenbeschaffenheit jedoch nicht möglich ist, kann die Möglichkeit zur Vorbereitung für eine Wiederholung aufgabenrelevanter Informationen (*rehearsal*) genutzt werden, bevor die Aufgabe unterbrochen wird (Trafton und Monk, 2007). Dieser Prozess kann dazu führen, dass Aufgaben anschließend leichter wieder aufgenommen werden können. Eine fehlende Möglichkeit zum *Memorieren* aufgabenrelevanter Informationen vor und während einer Unterbrechung hat demnach einen negativen Einfluss auf die Wiederaufnahmekosten (Trafton & Monk, 2007).

Zusammengefasst deuten die Erkenntnisse darauf hin, dass es sich bei der Möglichkeit zur Vorbereitung von Unterbrechungen um einen zentralen Ansatzpunkt für die Verbesserung des Aufgabenwechsels in Übernahmesituationen handelt. Wenn Fahrer durch die Bereitstellung von frühzeitigen Informationen über die Übernahmenotwendigkeit die Möglichkeit erhalten, die Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit selbst zu regulieren und sie zu einem geeigneten Zeitpunkt stattfinden zu lassen, fallen die Wechsel- und Wiederaufnahmekosten vermutlich geringer aus, als wenn die Unterbrechung durch eine plötzliche Übernahmeaufforderung fremd-initiiert stattfindet (Arrington & Logan, 2005; Borst et al., 2015; McFarlane & Latorella, 2002). Kurzfristige Übernahmeaufforderungen bieten diese Möglichkeit der Vorbereitung nicht und können deswegen aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion nur als Notlösung angesehen werden. Diese Arbeit befasst sich mit der Konzeption und der Untersuchung der Wirksamkeit eines solchen frühzeitigen Anzeigeconzepts.

2.3.2 Zeitpunkt der Vorinformation

Der Zeitpunkt, zu dem frühzeitige Informationen dargeboten werden, spielt für die Vorbereitung des Aufgabenwechsels eine wichtige Rolle. Das 3-Ebenen Modell der Nebenaufgabenbeschäftigung von Rauch (2009) bietet einen konzeptuellen Rahmen für die zeitliche Gestaltung von Vorinformationen, die den Fahrer bei der Bearbeitung von fahrfremden

Tätigkeiten unterstützen sollen. Rauch leitete die drei Ebenen *planning*, *decision* und *control* aufgrund typischer Bearbeitungsstrategien im Umgang mit Nebentätigkeiten anhand mehrerer Studien zur Aufgabenbearbeitung beim manuellen Fahren ab (Rauch, 2009). Durch die Übertragung des Modells auf den Kontext des hochautomatisierten Fahrens lassen sich die Ebenen der Aufgabenbearbeitung folgendermaßen beschreiben:

1. **Strategische Planung:** Strategische Planung beinhaltet die Auswahl von unterschiedlichen Aufgaben im Hinblick auf die anstehende Fahrsituation. Sie findet in einem Zeitrahmen von Minuten statt. Beim automatisierten Fahren kann dies bedeuten, zeitaufwändige fahrfremde Tätigkeiten während eines längeren automatisierten Fahrtabschnitts auszuführen und nicht zu beginnen, wenn nur noch wenig Zeit bis zur nächsten Übernahme zur Verfügung steht.
2. **Taktische Entscheidungen:** Durch taktische Entscheidungen kann beim hochautomatisierten Fahren die Handlungsvorbereitung auf die nächste Übernahmesituation erfolgen. Sie bestimmen unter anderem, ob eine Aufgabe in der gegebenen Fahrsituation weiterbearbeitet wird oder besser unterbrochen werden soll. Sie spielen sich in einem Zeitrahmen von Sekunden ab.
3. **Kontrolle:** Bei der Bearbeitung einer Nebenaufgabe während des manuellen Fahrens tätigt der Fahrer Kontrollblicke im Millisekundenbereich, um das Verkehrsgeschehen zu kontrollieren. Während der hochautomatisierten Fahrt ist dieser Teilaspekt zunächst nicht von Bedeutung, da die Fahrsituation nicht kontinuierlich überwacht werden muss. Relevant wird die Kontrolle in Verbindung mit einer getroffenen taktischen Entscheidung, wenn die Bearbeitung kurz vor der Unterbrechung steht (Janssen et al., 2019).

Im Folgenden werden zwei Ausprägungen frühzeitiger Anzeigekonzepte vorgestellt, die den Fahrer entweder bei taktischen oder strategischen Entscheidungen im Vorfeld eines Aufgabenwechsels von der hochautomatisierten zur manuellen Fahrt unterstützen, und die sich in ihrem Präsentationszeitpunkt unterscheiden (siehe Abbildung 3).

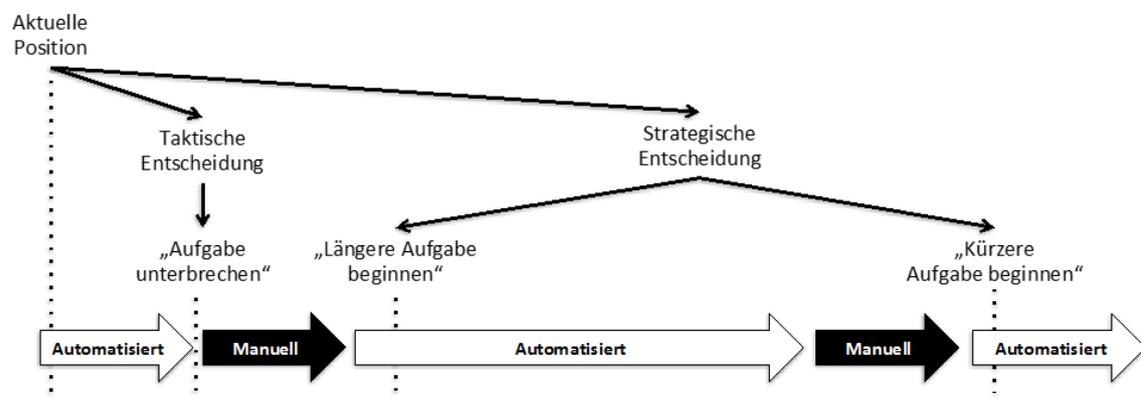


Abbildung 3: Unterscheidung in taktische und strategische Handlungsplanung beim Wechsel zwischen fahrfremder Tätigkeit und manuellem Fahren.

2.3.2.1 Event-basierte Ankündigung zur taktischen Unterstützung

Zur Unterstützung von **taktischen Entscheidungen** bei der Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten wird in dieser Arbeit eine sogenannte *event-basierte* Ankündigung eingeführt und empirisch untersucht. Im Mittelpunkt von Studie 1 steht der generelle Nutzen einer solchen Ankündigung im Vergleich zu kurzfristigen, dringlichen Übernahmeaufforderungen. Durch die Ankündigung, die zeitlich vor einer kurzfristigen Übernahmeaufforderung ausgegeben wird, erhält der Fahrer in Annäherung an eine prädzierbare Systemgrenze frühzeitig Informationen über die Notwendigkeit der manuellen Kontrollübernahme, um sich auf den Aufgabenwechsel vorbereiten zu können.

Die Möglichkeit, den Fahrer schon frühzeitig über Systemgrenzen zu informieren, wurde bereits in einigen Studien zum automatisierten Fahren adressiert. Dabei wurden vor allem Konzepte untersucht, in denen diskrete Informationen zu einem definierten Zeitpunkt vor dem Erreichen von Systemgrenzen ausgegeben wurden. Die wesentlichen Ansätze und Ergebnisse von empirischen Arbeiten zu frühzeitigen Übernahmekonzepten werden im Folgenden dargestellt.

Lapoehn et al. (2016) verglichen zwei Übernahmestrategien miteinander: Entweder wurde nur eine Übernahmeaufforderung dargeboten (10 Sekunden vor einer Systemgrenze) oder es wurde 16 Sekunden vor der Übernahmeaufforderung zusätzlich eine Vorinformation gegeben, die den Grund für die Übernahmeaufforderung enthielt („roadworks ahead, please prepare for take over“). Die Fahrer hatten die Hände in der Vorwarnbedingung früher am Lenkrad und übernahmen die Fahrzeugkontrolle frühzeitiger vor Erreichen der Systemgrenze. Die Bedingung mit Vorinformation wurde von den Probanden auch subjektiv als nützlicher beurteilt.

Van der Heiden et al. (2017) verglichen unterschiedliche auditive Ankündigungskonzepte mit einer Baseline-Bedingung ohne Vorinformationen. Die Ankündigung wurde jeweils 20 Sekunden vor dem Erreichen der Übernahmesituation ausgegeben und bestand entweder aus einer Folge von Warntönen (drei aufeinanderfolgende Töne, jeweils 20 Sekunden, 10 Sekunden und 1 Sekunde vor der finalen Übernahmeaufforderung) oder einem kontinuierlichen, graduellen Anstieg der Warnfrequenz während der 20 Sekunden. Verglichen mit der Bedingung ohne Ankündigung beendeten die Probanden mit Ankündigung eine fahrfremde Tätigkeit früher und blickten früher und häufiger zurück zur Straße. Außerdem hatten die Probanden mit Vorwarnung eine niedrigere Herzfrequenz. Dies deuteten die Autoren als Anzeichen eines geringeren Stresslevels.

Pampel et al. (2019) untersuchten geplante und ungeplante unkritische Übernahmesituationen und verglichen dazu ein zur Verfügung stehendes Zeitbudget von 5 und 50 Sekunden. Im Fokus der Studie stand, inwieweit ein größeres zur Verfügung stehendes Zeitfenster die Vorbereitung auf den Aufgabenwechsel erleichtern würde. Die Autoren beobachteten bei geplanten Übernahmen

(d. h. beim 50 Sekunden Zeitfenster) ein verbessertes Fahrverhalten in Bezug auf die longitudinale Fahrzeugkontrolle. Die Probanden erhöhten die Geschwindigkeit nach der Systemgrenze (sich auflösender Stau) in diesem Fall schneller. Variablen der Übernahmezeit wurden nicht berichtet.

Lu et al. (2019) griffen das von Gold, Damböck und Bengler (2013) untersuchte Konzept des sogenannten *monitoring requests* auf, das dem Fahrer in Situationen, in denen unklar ist, ob übernommen werden muss, auf eine potentielle Übernahme vorbereiten soll. Ziel ist es, den Blick des Fahrers auf die Fahrbahn zu lenken, während die Automation kurzzeitig in einen Zustand des teilautomatisierten Fahrens wechselt, in dem die Verkehrssituation überwacht werden muss. Die Autoren verglichen eine Bedingung, in der nur eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde, mit einer Bedingung, in der die Fahrer 7 Sekunden vor der Übernahmeaufforderung (diese erschien 5 Sekunden vor Erreichen der Systemgrenze) einen *monitoring request* erhielten. Aufgrund des *monitoring requests* überwachten die Fahrer die Verkehrssituation stärker, zeigten eine bessere und schnellere Übernahme und berichteten auf subjektiver Ebene eine geringere Beanspruchung, höhere Akzeptanz und ein höheres Vertrauen als in der reinen Übernahmeaufforderungs-Bedingung.

Einige Autoren schlagen vor, eine explizite Anzeige der Distanz oder Zeit bis zur Systemgrenze in die Ankündigungskonzepte zu integrieren. Dadurch besteht die Möglichkeit, die verbleibende Zeit im automatisierten Modus besser abschätzen zu können, wodurch eine selbst-initiierte Unterbrechung zu einem sinnvollen Zeitpunkt unterstützt werden kann. Naujoks, Forster, Wiedemann und Neukum (2017a) zeigten die Distanz bis zur nächsten Systemgrenze durch einen sich aktualisierenden horizontalen Balken, der seine Länge relativ zur verbleibenden Distanz verändert, an. Ein ähnliches Konzept verwendeten auch Lapoehn et al. (2016) mit dem Unterschied, dass der Distanzbalken direkt in das Display, auf dem die fahrfremde Tätigkeit dargeboten wurde, integriert war. Larsson (2017) schlug ein *Countdown-Konzept* vor, das den Fahrer vor Erreichen der Systemgrenze über die verbleibende Zeit im automatisierten Modus informierte. Bisher existieren allerdings wenige empirische Studien, die Aussagen über den Nutzen dieser Erweiterung treffen können.

Richardson, Flohr und Michel (2018) verglichen in diesem Zusammenhang drei Konzepte, die sich in Menge und Präsentationsformat der Information unterschieden. Während in einer Bedingung nur eine einfache Übernahmeaufforderung dargeboten wurde („Bitte übernehmen“), waren die anderen Bedingungen entweder durch eine zeitbasierte Vorinformation („Bitte in 10 s übernehmen“) oder eine abstandsbaasierte Vorinformation („Bitte in 220 m übernehmen“) angereichert. Alle Konzepte wurden durch die Studienteilnehmer bezüglich ihrer Gebrauchstauglichkeit (engl. *usability*) als positiv beurteilt, wobei die erweiterten Konzepte hinsichtlich ihrer wahrgenommenen Nützlichkeit und Zufriedenstellung besser beurteilt wurden.

Das abstands-basierte Anzeigekonzept wurde als am nützlichsten beurteilt. Außerdem hatte die abstands-basierte Zusatzinformation eine geringere selbstberichtete Interferenz mit der Ausführung der fahrfremden Tätigkeit zur Folge. Die Autoren merken an, dass das positive Abschneiden der distanzbasierten Information von der Tatsache beeinflusst sein kann, dass es sich bei den Probanden um LKW-Fahrer handelte, die berufsbedingt an den Umgang mit distanzbasierten Informationen gewöhnt sind.

Holländer und Pfleging (2018) verglichen verschiedene Konzepte zur Darstellung der zur Verfügung stehenden Zeit für geplante Übernahme-situationen (*pre-warnings*): (1) numerische Anzeige der Restzeit (Countdown), (2) Abstandsbalken und (3) kein Vorwarnkonzept. Verglichen mit der Bedingung ohne zusätzliche Information fanden sich zwar keine Effekte der Vorwarnbedingungen auf die zeitliche Reaktion, wohl aber auf die Häufigkeit von „idealem“ Fahrverhalten, welches von den Autoren durch eine Kombination mehrerer Variablen bestimmt wurde. Die Probanden schätzten außerdem die Gebrauchstauglichkeit der Balkenanzeige am höchsten ein und bevorzugten dieses Konzept mehrheitlich gegenüber dem Konzept ohne Abstands-anzeige und dem des Countdown-Konzepts.

Zusammenfassend weisen die Studien größtenteils auf positive Effekte frühzeitiger Ankündigungen auf das Übernahmeverhalten hin, während Aussagen zum Einfluss auf die Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten nur vereinzelt getroffen werden. Bislang ist jedoch unklar, zu welchem Zeitpunkt Vorinformationen idealerweise präsentiert werden sollten. Die meisten Studien verglichen eine späte Übernahmeaufforderung mit einer frühzeitigen Ankündigung, die zwischen 12 und 50 Sekunden vor Erreichen der Systemgrenze ausgegeben wurde. Die Frage des Zeitpunkts wird deshalb in dieser Arbeit erneut aufgegriffen (Studie 2). Da die berichteten Studien bezüglich der Art der bevorzugten Darstellung der Entfernung bis zur Systemgrenze Anhaltspunkte geben, dass distanzbasierte Informationen bevorzugt wurden, wurde in Studie 2 ein derartiges Konzept umgesetzt.

2.3.2.2 Start-basierte Vorausschau zur strategischen Unterstützung

Neben der Ermöglichung von taktischen Entscheidungen über den geeigneten Unterbrechungszeitpunkt einer Tätigkeit, kann der Fahrer auch auf **strategischer Ebene** bei der längerfristigen Aufgabenplanung unterstützt werden. Dies kann durch eine permanente Anzeige der Restzeit oder Restdistanz bis zur nächsten Systemgrenze geschehen. Wenn Fahrer wissen, wie weit eine Systemgrenze entfernt ist oder wie viel Zeit ihnen noch im automatisierten Modus bleibt, können die Aufgaben so ausgewählt werden, dass sie rechtzeitig vor dem nächsten Übernahmeverfordernis beendet sind. Auf diese Weise können Aufgabenunterbrechungen und die damit in Verbindung stehenden negativen Auswirkungen auf die Fahraufgabe und die

Ausführung der fahrfremden Tätigkeit vollständig vermieden werden. Durch eine störungsfreie Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten wird die Nutzeranforderung an das automatisierte Fahren, die Fahrtzeit für die Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten zu verwenden (bspw. König & Neumayr, 2017; Large, Burnett, Morris, Muthumani, & Matthias, 2017), in besonderer Weise berücksichtigt. Im Bereich von Bildschirmarbeitsplätzen sind kontinuierliche Anzeigen der zur Verfügung stehenden Restzeit bis zu einem notwendigen Aufgabenwechsel bereits erfolgreich eingesetzt worden (Müller, Kazakova, Pielot, Heuten, & Boll, 2013; Ostendorp et al., 2013).

Die Darstellung einer Vorausschau über den aktuellen automatisierten Fahrabschnitt oder die Gesamtfahrt wurde bislang noch nicht in vielen Studien untersucht. Wandtner et al. (2018b) verglichen ein Konzept mit Vorausschau über die Entfernung bevorstehender Übernahmen mit einem Konzept ohne diese Vorausschau. Die Fahrer der Vorausschau-Bedingung steuerten ihr Bearbeitungsverhalten vor Übernahmesituationen selbstreguliert, indem sie weniger vom System angebotene Aufgaben (Abschreiben von Text auf einem Tablet) annahmen als die Fahrer der Gruppe ohne Vorausschau. Es liegen jedoch noch keine Arbeiten vor, in denen die kontinuierliche Darbietung der verbleibenden Distanz im automatisierten Modus mit diskreten Vorinformationen wie der event-basierten Ankündigung verglichen wurde, um zu überprüfen, wie sich das strategische Bearbeitungsverhalten in Abhängigkeit verschiedener Anzeigekonzepte verändert. Dieser Vergleich erfolgt in Studie 3.

2.3.3 Spezifität der Vorinformationen

Bezüglich des Inhalts der Vorinformation stellt sich die Frage, ob eine unspezifische Information über den Aufgabenwechsel (d. h. nur die Information, *dass* eine Übernahme bevorsteht) ausreichend ist, oder ob eine aufgabenspezifische Vorbereitung (z. B. durch Informationen über das nach der Transition auszuführende Manöver) die Übernahmequalität steigern kann. Aus der Grundlagenforschung existieren Hinweise darauf, dass vor allem eine aufgabenspezifische Vorbereitung Wechselkosten verringert. Beispielsweise untersuchten Nicholson, Karayanidis, Davies und Michie (2006) spezifische Hinweisreize (*cues*) über die als nächstes auszuführende Aufgabe in einem Aufgabenwechsel-Setting. Die Probanden mussten in jedem Durchgang jeweils eine von drei möglichen Aufgaben ausführen. Die Hinweisreize zeigten entweder, dass (1) dieselbe wie die vorherige Aufgabe ausgeführt werden sollte, (2) welche andere Aufgabe ausgeführt werden sollte oder (3) nur, dass eine andere Aufgabe ausgeführt werden sollte. Die Autoren berichten von schnelleren Reaktionszeiten, wenn die Probanden vorher wussten, zu welcher Aufgabe sie wechseln mussten, als wenn sie nur wussten, dass sie wechseln mussten. Basierend darauf kann angenommen werden, dass die Vorbereitung des Aufgabenwechsels durch

spezifische Hinweise über die bevorstehende Fahraufgabe unterstützt werden kann, und die Nützlichkeit von Vorinformationen zumindest teilweise von deren Inhalt abhängt.

Die Unterstützung durch eine spezifische Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle kann auf unterschiedlichen Ebenen der Informationsverarbeitung wie der Informationsaufnahme, der Informationsanalyse und der Handlungsselektion geschehen (Borojeni, Weber, Heuten, & Boll, 2018; Eriksson et al., 2018; Parasuraman et al., 2000). Bezüglich der Informationsaufnahme und -analyse kann der Aufbau von Situationsbewusstsein durch die Übermittlung spezifischer Informationen über die Systemgrenze unterstützt werden, da die Übernahme-situation aufgrund der Frühzeitigkeit von Vorinformationen zum Präsentationszeitpunkt nicht unmittelbar sichtbar sein wird (Naujoks, Purucker et al., 2017; siehe auch Naujoks, Grattenthaler, Neukum, Weidl, & Petrich, 2015). Auch die Unterstützung bei der Handlungsselektion im Anschluss an die Kontrollübernahme könnte sich positiv auf die Übernahmeleistung auswirken (Eriksson et al., 2018). Bislang besteht allerdings noch kein Konsens darüber, welche Informationen von Fahrern bei einer Vorinformation benötigt werden. Das Kontinuum der Möglichkeiten reicht von einer Darbietung der reinen Information, *dass* die Fahrzeugkontrolle übernommen werden muss, über die Information zu den Gründen der Übernahmeaufforderung, bis hin zu einer detaillierten Darstellung, welche Fahrmanöver nach der Rückführung in die Fahraufgabe vollzogen werden müssen (vgl. Eriksson et al., 2018; Lorenz, Kerschbaum, & Schumann, 2014). In der überwiegenden Anzahl der Forschungsarbeiten zu dringlichen Übernahmeaufforderungen werden Fahrer lediglich darüber informiert, *dass* eine Übernahme-situation bevorsteht. Typischerweise werden dazu die notwendigen Handlungsschritte zur Wiedererlangung der manuellen Fahrzeugkontrolle im Anzeigekonzept angezeigt. Oft wird eine Anzeige wie „Bitte übernehmen!“ mit der Darstellung von Händen am Lenkrad und Füßen auf den Pedalen gewählt (Naujoks et al., 2017a), die von einer generischen auditiven Ausgabe (Naujoks et al., 2014) oder einer Sprachausgabe (Forster, Naujoks, Neukum, & Huestegge, 2017; Walch, Lange, Baumann, & Weber, 2015) begleitet wird. In anderen Fällen werden generische auditive Warnungen verwendet, die keine zusätzlichen visuellen Informationen beinhalten (Feldhütter, Gold, Schneider, & Bengler, 2017; Körber, Gold, Lechner, & Bengler, 2016).

In Zusammenhang mit der Spezifität ist auch die *Transparenz* (Kiesel et al., 2010) der vermittelten Informationen relevant. Wechselkosten hängen zum Teil davon ab, ob Hinweise auf die anstehende Aufgabe transparent (d. h. direkte Information über die auszuführende Aufgabe, etwa durch einen Wort-Hinweis) oder intransparent sind (wenn die Aufgabe durch ein abstraktes Symbol angezeigt wird, dessen Bedeutung erst assoziativ gelernt werden muss). Eine Übersicht über Studien, die diese Annahme stützen, findet sich in Kiesel et al. (2010; siehe bspw. Arbuthnott & Woodward, 2002; Logan & Schneider, 2006). Es wird angenommen, dass nicht-transparente Hinweise zunächst internal verbalisiert werden, um deren Bedeutung aus dem

Gedächtnis abzurufen, bevor sie in eine Handlung umgesetzt werden (Kiesel et al., 2010; Logan & Schneider, 2006; Mayr & Kliegl, 2000). Transparente Hinweise können hingegen direkter in Handlungen überführt werden, da aus ihnen durch Selbstinstruktion leichter Intentionen gebildet werden können (bspw. „reagiere auf die Farbe“; Goschke, 2000). Bezogen auf den Anwendungskontext der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle beim hochautomatisierten Fahren legen diese Erkenntnisse nahe, dass eine abstrakte, symbolische Anzeige, die nicht intuitiv dekodiert werden kann, weniger effektiv sein wird, als beispielsweise verbal vermittelte Anzeigen (d. h. Textlabels oder Sprachausgaben, siehe Forster et al., 2017).

Die folgenden Unterkapitel fassen Ergebnisse zu den verschiedenen Möglichkeiten zur Anreicherung der Vorinformation mit spezifischen Informationen, die über die Vermittlung der Übernahmenotwendigkeit hinausgehen, zusammen.

2.3.3.1 Grund der Übernahmeaufforderung

Zunächst könnte der *Grund der Übernahmeaufforderung* angezeigt werden. Naujoks und Purucker et al. (2017) berichten eine Studie zum teilautomatisierten Fahren, in der Probanden an unterschiedlichen Systemgrenzen zur Übernahme der Fahrzeugführung aufgefordert wurden. Die Übernahmeaufforderung enthielt dabei keine Informationen über die Gründe, warum diese ausgegeben wurde. Die Fahrer waren zwar in der Lage, sicher die manuelle Fahrzeugkontrolle zu übernehmen, konnten aber in vielen Fällen die Gründe für die Übernahmeaufforderung nicht korrekt benennen. Die Übernahmeaufforderungen wurden als „mittel“ hilfreich bewertet. Körber, Prasch und Bengler (2018) fanden in einer Studie beim hochautomatisierten Fahren, dass eine nachträgliche Aufklärung über die Gründe einer Übernahmeaufforderung das Systemverständnis erhöhen konnte, ohne sich jedoch positiv auf Systemvertrauen und Akzeptanz auszuwirken. Einige Studien sind diesem Ansatz bereits gefolgt, indem sie Informationen über die Systemgrenze präsentieren (wie bspw. „Baustelle“ oder „Fehlende Markierung“, vgl. Forster, Naujoks, & Neukum, 2016; Lapoehn et al., 2016; Naujoks et al., 2017a).

Bei der Gestaltung von Warnausgaben im Kontext des manuellen Fahrens wurden die Effekte der Spezifität von Anzeigen bereits vielfach diskutiert. Dabei zeigte die Anzeige des Grundes (beispielsweise in Form verschiedener auditiver Warnungen für verschiedene Kollisionstypen) meist keine Verbesserung der Fahrerreaktion (beispielsweise durch schnellere Reaktionszeiten) gegenüber generischen Warnkonzepten (siehe Cummings, Kilgore, Wang, Tijerina, & Kochhar, 2007; Naujoks & Neukum, 2014; Thoma, Lindberg, & Klinker, 2009). Koo et al. (2015) berichten bei automatischen Notbremszenarien von einer erhöhten Akzeptanz und Fahrsicherheit, wenn den Fahrern der Grund für das Manöver („obstacle ahead“) dargeboten wurde.

Es liegen bislang wenige empirische Arbeiten vor, die Aussagen über die Auswirkungen der Anzeige des Grundes der Übernahmeaufforderung im Vorfeld der Übernahme-situation erlauben. Gerade in komplexen Übernahme-situationen, in denen Fahrer die Situation analysieren, ein Fahrmanöver selektieren und dieses ausführen müssen (Gold, Naujoks et al., 2017), kann der Grund der Übernahme für die Fahrer eine nützliche Information darstellen (siehe auch Körber et al., 2018). Dabei ist anzunehmen, dass Fahrmanöver früher ausgeführt werden, wenn zeitverbrauchende kognitive Prozesse zur Interpretation der Fahrsituation effektiv unterstützt werden (Eriksson et al., 2018). Walch et al. (2015) untersuchten einen zweistufigen Übernahme-prozess, bei dem zwei Sekunden vor der Übernahmeaufforderung der Grund für eine bevorstehende Übernahme-situation angezeigt wurde. Verglichen mit einem einstufigen Konzept berichten die Autoren von einer subjektiven Präferenz der kombinierten Anzeige. Die Probanden reagierten allerdings später auf die Warnung mit zusätzlicher Anzeige als auf die reine (unspezifische) Warnung. Die Autoren führen dies darauf zurück, dass die Sicht auf die Fahrszenarie durch eine Überlagerung mit der Anzeige beeinträchtigt war und der Grund der Übernahme (Nebel) im Moment der Warnung bereits sichtbar war. Laut Körber et al. (2018) könnte auch der erhöhte kognitive Workload durch die zusätzlichen Informationen für die schlechtere Leistung verantwortlich sein, da diese fast zeitgleich zur Übernahmeaufforderung dargeboten wurden.

Insgesamt sind die Befunde zur Anzeige des Grundes der Übernahmeaufforderung als heterogen zu bezeichnen. Zu erwarten sind vor allem Auswirkungen auf die Akzeptanz und weniger auf die Übernahmezeit und -qualität. Im ungünstigsten Fall könnte eine Anzeige des Grundes zu einer Verlängerung der Reaktionszeit führen, wenn der Fahrer zusätzliche Informationen in einer dringlichen Übernahme-situation verarbeiten muss (vgl. Thoma et al., 2009). Im Kontext frühzeitiger Situationsankündigungen, bei denen dem Fahrer ausreichend Zeit für die Verarbeitung der Informationen zur Verfügung stehen sollte, ist es jedoch durchaus denkbar, dass die Anzeige der Systemgrenze auch positive Einflüsse auf das Fahrverhalten hat.

2.3.3.2 Örtliche Informationen

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Spezifität von Vorinformationen besteht darin, **örtliche Informationen** über die Systemgrenze, wie etwa die Position, an der sich eine potentielle Gefahr befindet, an den Fahrer zu übermitteln. Durch das Lenken der Aufmerksamkeit auf relevante Elemente in der Umgebung kann laut Eriksson et al. (2018) die Informationsanalyse in Übernahme-situationen beim automatisierten Fahren unterstützt werden. Grundlegende Studien aus der kognitiven Psychologie liefern Hinweise auf die Wirksamkeit ortsspezifischer Warnungen. Posner, Snyder und Davidson (1980), die das *spatial cueing paradigm* anwendeten, konnten zeigen, dass Studienteilnehmer, die durch Hinweisreize über die wahrscheinliche

Position eines Zielreizes informiert wurden, verringerte Reaktionszeiten zeigten. In der Forschung zu Fahrerwarnungen erwiesen sich richtungsspezifische Warnungen, welche die Richtung, aus der ein Konflikt droht, anzeigen, häufig als nützlicher als unspezifische Warnungen (bspw. Naujoks & Neukum, 2014; Schwarz & Fastenmeier, 2017; Zhang, Yan, & Yang, 2015).

Im Anwendungsbezug des automatisierten Fahrens können örtliche Informationen über die Übernahme-situation auf unterschiedliche Arten vermittelt werden. Cohen-Lazry, Katzman, Borowsky und Oron-Gilad (2018) untersuchten den Effekt von taktilen Übernahmeaufforderungen anhand von Sitzvibrationen, welche die Aufmerksamkeit des Fahrers entweder auf den Übernahmegrund (liegendegebliebenes Fahrzeug) lenken oder von diesem wegführen sollten. Dabei zeigten sich schnellere Lenkreaktionszeiten weg vom Hindernis, wenn die Warnung ebenfalls weg vom Hindernis gerichtet war. In einer Studie von Petermeijer, Cieler und de Winter (2017) erhielten die Fahrer gerichtete Sitzvibrationen, die sie über die Richtung eines notwendigen Spurwechsels nach der manuellen Kontrollübernahme informieren sollten. Allerdings konnten die Fahrer die Richtungsinformation nicht zuverlässig identifizieren und wünschten sich mehrheitlich einen zusätzlichen auditiven und/oder visuellen Hinweis. Vibrotaktile Hinweise sind unter Umständen weniger dazu geeignet, semantische Informationen im Kontext von Übernahme-situationen zu transportieren als visuelle oder auditive Rückmeldungen (Eriksson et al., 2018). Borojeni, Chuang, Heuten und Boll (2016) gingen ebenfalls der Frage nach, ob die Angabe der Richtung, in welche die Fahrer lenken sollten, um einem Hindernis auszuweichen, die Übernahme in einem Spurwechselszenario verbessert. Die Informationen wurden in diesem Fall über eine Lichtleiste im peripheren Sichtfeld dargeboten. Bei Übermittlung dieser Information fanden die Autoren geringere Reaktionszeiten (in Form eines schnelleren Einlenkens) und weniger kritische Situationen. Van den Beukel, van der Voort und Eger (2016) gaben in ihrer Studie ebenfalls Übernahmeaufforderungen mit einer Richtungskomponente (in Form einer ambienten Illumination an verschiedenen Orten der Windschutzscheibe) aus, fanden jedoch keine gesteigerte Leistung der Teilnehmer während der Übernahme-situationen im Vergleich zu den ebenfalls untersuchten nicht-richtungsweisenden Übernahmekonzepten.

Während das Konzept von informationsangereicherten Übernahmeaufforderungen mit Richtungsinformationen auf theoretischer Ebene vielversprechend ist (siehe Posner et al., 1980), konnte eine erfolgreiche Anwendung im Bereich von Übernahmen der manuellen Fahrzeugkontrolle nicht immer gezeigt werden. Ein Erklärungsansatz könnte darin bestehen, dass aufmerksamkeitsrichtende Informationen die Interpretation und Handlungsableitung aus der Situation dem Fahrer überlassen (Lee, Gore, & Campbell, 1999). Dies gilt auch für die reine Angabe des Übernahmegrundes. Zur Erleichterung der Handlungsvorbereitung könnte der Fahrer

auf der Ebene der Reaktionsselektion unterstützt werden (Eriksson et al., 2018). Dieses Konzept wird im nächsten Kapitel beschrieben.

2.3.3.3 Erforderliches Fahrmanöver

Zur Unterstützung der Reaktionsselektion könnte dem Fahrer das für eine erfolgreiche Übernahme *erforderliche Fahrmanöver* wie beispielsweise die Notwendigkeit eines Spurwechsels angezeigt werden (Eriksson et al., 2018). Beim manuellen Fahren wurden Warnungen mit einer direkten Handlungsaufforderung (bspw. „slow down“ vs. „icy road ahead“; Lee et al., 1999; Zhang, Wu, Qiao, & Hou, 2019) zur Steigerung der Verhaltenswirksamkeit bereits untersucht, wobei die Ergebnisse hinsichtlich der Fahrsicherheit nicht uneingeschränkt positiv waren. Anwendungen im Bereich des hochautomatisierten Fahrens liegen bislang nur vereinzelt vor. Eriksson et al. (2018) verwendeten unterschiedliche Varianten von *Augmented Reality* (AR)-Anzeigen, um direkte und indirekte Aufforderungen zu Brems- oder Ausweichmanövern darzustellen, die nach der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle auszuführen waren (direkt: grüner Pfeil auf benachbarten Fahrstreifen; indirekt: grüne Einfärbung der benachbarten Fahrspur). Diese wurden mit einem Konzept, welches nur einen Hinweis auf den Ort bzw. Übernahmegrund (Hervorhebung eines langsamen Vorderfahrzeugs) enthielt, und einer Baseline-Bedingung verglichen. Bei beiden Konzepten, die Hinweise auf die korrekte Handlung (d. h. Fahrstreifenwechsel) enthielten, wurde eine Steigerung der erfolgreichen Übernahmen gegenüber den unspezifischeren Übernahmekonzepten gefunden. Borojeni et al. (2018) untersuchten, ob eine Übernahmeaufforderung, die spezifische Informationen über das auszuführende Manöver enthielt (Bremsen vs. Ausweichen), Vorteile im Gegensatz zu einer generischen Übernahmeaufforderung birgt. Sie fanden schnellere Reaktionszeiten, größere *Time-to-collision*-Werte (engl. TTC; was einer geringeren Situationskritikalität entspricht) sowie seltenere Fehler bei der Manöverauswahl bei spezifischen Konzepten. Langlois und Soualmi (2016) verglichen AR-Anzeigen, welche dem Fahrer nach der Übernahme Navigationshinweise gaben, mit einem konventionellen Head-Up Display ohne AR-Inhalte. Das AR-Display verringerte zwar nicht die Übernahmezeit, die Autoren berichteten aber von einer besseren Übernahmequalität, gemessen an den aufgetretenen resultierenden Beschleunigungen. Außerdem führten die Probanden mit dem AR-Konzept ein notwendiges Manöver (Fahrstreifenwechsel) nach der Deaktivierung der Automation in größerem Abstand zur Systemgrenze durch.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass erste Ansätze, den Fahrer durch spezifische Vorinformationen bei der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle zu unterstützen, bereits erfolgreich getestet wurden. Die Anzeige des notwendigen Fahrmanövers erscheint hierbei besonders vielversprechend. Im empirischen Teil dieser Arbeit wird die Untersuchung der Wirksamkeit von spezifischen Informationen, die über die reine Information zur

Übernahmenotwendigkeit hinausgehen, nochmals aufgegriffen und in ein frühzeitiges Ankündigungskonzept integriert (Studie 2).

2.3.4 Zusammenfassung

Basierend auf den kognitiven Grundlagen zu Aufgabenwechseln und Erkenntnissen aus bisherigen Studien zu Übernahme-situationen wird in dieser Arbeit eine prototypische Mensch-Maschine-Schnittstelle, die den Fahrer frühzeitig über Systemgrenzen informieren soll, entwickelt und experimentell untersucht. Ziel der Arbeit ist die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für ein solches erweitertes Übernahmekonzept. Durch eine frühzeitigere Kommunikation sollten Nutzer hochautomatisierter Fahrzeuge die Möglichkeit erhalten, sich auf sensorischer, kognitiver und motorischer Ebene auf den Aufgabenwechsel zum manuellen Fahren vorzubereiten. Gleichzeitig sollten sie ihre Involviertheit in fahrfremde Tätigkeiten entsprechend der zur Verfügung stehenden Zeit auf taktischer bzw. strategischer Ebene planen können. Mit ausreichender Vorbereitungszeit sollte der Fahrer die Möglichkeit haben, den Zeitpunkt der Aufgabenunterbrechung selbst zu bestimmen, sodass die Weiterbearbeitung nicht in einem zeitkritischen Zeitfenster erfolgt und eine spätere Wiederaufnahme der unterbrochenen Tätigkeit erleichtert wird. Durch die Anzeige der verbleibenden Restdistanz sollten Aufgaben so ausgewählt werden können, dass sie rechtzeitig vor dem Erreichen einer Systemgrenze abgeschlossen sind. Das Erreichen von Teilzielen oder die vollständige Beendigung einer Aufgabe vor der manuellen Kontrollübernahme sollte dazu führen, dass Aufgabeninhalte nicht mehr aktiv sind oder aktiv im Gedächtnis gehalten werden müssen, wodurch eine Belastung des Arbeitsgedächtnisses des Fahrers während der Übernahme vermieden wird. Auch motorische Prozesse der Aufgabenunterbrechung (beispielsweise das Weglegen von in der Hand gehaltenen Gegenständen) sollten auf diese Weise frühzeitig abgeschlossen sein, so dass sie die manuelle Kontrollübernahme nicht beeinträchtigen. Durch die frühzeitigen Vorinformationen wird einerseits eine Steigerung der Sicherheit der manuellen Kontrollübernahme erwartet, indem es zu einer Verbesserung der Übernahmeleistung in Form von frühzeitigeren Übernahmen und einer Verbesserung der Fahrzeugführung nach der Übernahme kommt. Andererseits sollten sich ebenfalls Vorteile bei der Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten ergeben, was den Übernahmekomfort erhöhen sollte und nicht zuletzt eine Rolle für die Akzeptanz des automatisierten Fahrens spielen kann (Naujoks, Wiedemann et al., 2017). Der empirische Teil der Arbeit wird sich mit den postulierten Vorteilen frühzeitiger und spezifischer Vorinformationen über Systemgrenzen beschäftigen und ausgewählte Teilaspekte experimentell untersuchen (Studie 1: Auswirkungen frühzeitiger Ankündigungen; Studie 2: Auswirkungen von Spezifität und Zeitpunkt frühzeitiger Ankündigungen; Studie 3: Vergleich kontinuierlicher Restdistanzanzeige mit diskreten Ankündigungen).

2.4 Automationsvertrauen und Systemfehler

Automatisiertes Fahren befindet sich aktuell bei einer Reihe von Fahrzeugherstellern und Zulieferern in einer Testphase. Staaten, in denen solche Tests im öffentlichen Straßenverkehr zugelassen sind, fordern eine Offenlegung bestimmter Testgrößen, insbesondere der im Pilotbetrieb aufgetretenen technischen Fehler und Systemausfälle (Dixit, Chand, & Nair, 2016; Favarò, Eurich, & Nader, 2018). Eine Analyse öffentlich verfügbarer Daten dieser Testphasen zeigt, dass unvorhersehbare Systemfehler – im Gegensatz zu prädizierbaren Systemgrenzen, die zu einer Übernahmeaufforderung führen – auch beim automatisierten Fahren nicht vollständig ausgeschlossen werden können (Favarò et al., 2018).

Da die Anzeigekomponente durch ihren prädiktiven Ansatz möglicherweise unzuverlässig ist (Carvalho, Lefèvre, Schildbach, Kong, & Borrelli, 2015; Weidl et al., 2013), sollten auch mögliche Konsequenzen einer fehlerhaften oder ausbleibenden Vorinformation untersucht werden, um den Gesamtnutzen eines erweiterten Übernahmekonzepts (d. h. mit frühzeitigen Situationsankündigungen) bewerten zu können. Eine umfassende Evaluation von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Bereich von Fahrerassistenzsystemen umfasst aus diesem Grund neben der Betrachtung des geplanten, fehlerfreien Betriebs (in diesem Fall wird die Ausgabe von Situationsankündigungen und Übernahmeaufforderungen als geplanter Betrieb angesehen) normalerweise auch die Betrachtung von Grenz- und Fehlerfällen des Systems (beispielsweise ein unerwartetes Ausbleiben von Ankündigungen oder eine fehlerhafte Angabe über die Restdistanz im automatisierten Modus) sowie deren Konsequenzen für potentielle Nutzer der Technologie (RESPONSE Consortium, 2006, Code of practice).

Die Reaktion von Nutzern auf Systemfehler der Automation ist mit dem Konstrukt des Automationsvertrauens assoziiert (Lee & Moray, 1992; Muir & Moray, 1996). Vertrauen in Automation betrifft hierbei einerseits, ob die Anweisungen bzw. Ausgaben einer Automation befolgt werden, wenn ein manueller Eingriff notwendig ist. Andererseits beinhaltet es, ob Nutzer auf das korrekte Funktionieren der Automation vertrauen, wenn diese keine Warnung oder andere Meldungen ausgibt. Meyer (2004) unterscheidet in diesem Zusammenhang die beiden Dimensionen *compliance* (Befolgung) und *reliance* (Verlassen) voneinander. In diesem Sinne kann die Befolgung von Übernahmeaufforderungen (d. h. ob und wie schnell Fahrer auf Übernahmeaufforderungen reagieren) als eine Dimension des Vertrauens in die Fahrzeugautomation gesehen werden (Forster et al., 2017). Ein zu starkes Vertrauen (engl. *overtrust* bzw. *overreliance*) und eine damit verbundene fehlende Bereitschaft zur Reaktion auf ungeplante Systemausfälle kann – wie Analysen im Bereich der Luftfahrt, in der Automation frühzeitiger und in stärkerem Maße als im Automobilbereich eingeführt wurde, zeigen (Kelly & Efthymiou, 2019) – zu kritischen Situationen führen. Ein tragisches Beispiel ist der tödliche

Zusammenstoß eines automatisierten Testfahrzeugs von Uber mit einer Fußgängerin im Jahr 2018 (Coppola & Frank, 22.06.2018).

Nach Brown und Noy (2004) hängt das Ausmaß, in dem sich Nutzer von Fahrerunterstützung (oder in diesem Anwendungsfall Automation) auf derartige Systeme verlassen, von deren Funktionsumfang bzw. von deren Leistungsvermögen ab (siehe auch Onnasch, Wickens, Li, & Manzey, 2014). Mit der Zunahme des Automationslevels wird auch eine Zunahme der Neigung zur Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten beschrieben (de Winter, et al. 2014; Naujoks et al., 2016), die als Automationsvertrauen interpretiert werden kann (Hergeth, Lorenz, Vilimek, & Krems, 2016; Seppelt, Lees, & Lee). Dementsprechend finden Kircher, Larsson und Hultgren (2013) beim assistierten und teilautomatisierten gegenüber dem manuellen Fahren eine Verringerung der Überwachung der Fahrzeugautomation, beispielsweise durch eine Reduktion von Blicken auf die Straße.

Basierend auf den zitierten Arbeiten ist anzunehmen, dass eine wie in dieser Arbeit angestrebte Erweiterung des Übernahmekonzepts durch frühzeitige Vorinformationen zu einem erhöhten Automationsvertrauen führt. Die verringerte Überwachung bei größerem Vertrauen könnte dazu führen, dass die Bereitschaft zur Reaktion auf plötzliche Automationsausfälle nachlässt (siehe Parasuraman & Riley, 1997; Parasuraman & Manzey, 2010). Die Verbindung von Überwachungsverhalten und Übernahmeleistung wurde beispielsweise von Zeeb, Buchner und Schrauf (2015) gezeigt. Probanden, die sich während der automatisierten Fahrt durch eine stärkere Blickabwendung weg von der Straße auszeichneten, brauchten länger, um auf ein kritisches Ereignis zu reagieren und produzierten mehr Kollisionen verglichen mit Probanden, die weniger Blickabwendung zeigten. Wenn Fahrer an den Erhalt von Ankündigungen gewöhnt sind, könnte dies im Fall von ausbleibenden Ankündigungen zu einer verringerten Übernahmeleistung führen.

Neben der Wirksamkeit der erweiterten Fahrerunterstützung werden in dieser Arbeit anhand der Betrachtung von Fehlerfällen auch Auswirkungen eines möglicherweise gesteigerten Automationsvertrauens untersucht. Der gewählte Ansatz ermöglicht eine umfassendere Sicht der Auswirkungen erweiterter Mensch-Maschine-Schnittstellen auf das Erleben und Verhalten von zukünftigen Nutzern hochautomatisierter Fahrzeuge in Bezug auf deren Chancen und Grenzen. In der **ersten Studie** wird deshalb untersucht, inwieweit sich der Erhalt von Ankündigungen während des fehlerfreien Betriebs auf die Reaktion bei ausbleibenden Ankündigungen und Übernahmeaufforderungen im Falle einer nicht erkannten Systemgrenze bei einem stillen Systemausfall auswirkt. Zwar liegen unaufgeforderte Eingriffe in die Fahrzeugführung zur Lösung der Situation beim hochautomatisierten Fahren (SAE L3) nicht in der Verantwortung des Fahrers. Jedoch stellt diese Fragestellung aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen einer Simulatoruntersuchung ein geeignetes Mittel zur Untersuchung der Auswirkung auf das

Automationsvertrauen dar. In der **zweiten Studie** wird der Frage nachgegangen, inwieweit das Zeitfenster frühzeitiger Ankündigungen die Reaktion auf kurzfristige Übernahmeaufforderungen beeinflusst, wenn frühzeitige Ankündigungen ausbleiben. Weiterhin sollte in der **dritten Studie** betrachtet werden, inwieweit eine mangelnde Genauigkeit der Vorhersage der verbleibenden Distanz im automatisierten Modus das Übernahmeverhalten bei unterschiedlichen Anzeige Konzepten beeinflusst. In Abhängigkeit der erwarteten Häufigkeit von derartigen Fehlerfällen können die Ergebnisse bei der Einschätzung helfen, ob das Ankündigungskonzept bei möglichen negativen Auswirkungen generell verwendet werden sollte.

3 Empirischer Teil

3.1 Studie 1: Frühzeitige Situationsankündigungen

3.1.1 Fragestellung

Ziel der ersten Studie war es, die Effekte frühzeitiger Situationsankündigungen auf den Aufgabenwechsel vom hochautomatisierten zum manuellen Fahren zu untersuchen. Der häufig in wissenschaftlichen Veröffentlichungen verfolgte Ansatz, im Falle einer Systemgrenze eine kurzfristige, dringliche Übernahmeaufforderung auszugeben, wurde um eine frühzeitige Ankündigung erweitert, die Informationen über die jeweilige Systemgrenze enthielt (z. B. Grund der Übernahmesituation). Diese soll den Fahrer auf die Übernahme vorbereiten, indem sie ihn beim Aufbau von Situationsbewusstsein (z. B. Erfassen der Fahrsituation) und Handlungsbereitschaft (z. B. Unterbrechung einer ausgeführten fahrfremden Tätigkeit sowie Planung auszuführender Fahrmanöver) unterstützt (vgl. van der Heiden et al., 2017, siehe Kapitel 2.3.1). Dadurch soll eine komfortable und sichere Übernahme gewährleistet werden. Zur Untersuchung der Effekte frühzeitiger Ankündigungen wurde eine prototypische visuell-auditive Mensch-Maschine-Schnittstelle in der Fahrsimulation umgesetzt.

Die Untersuchung bestand aus zwei Studienteilen. Im ersten Studienteil stand die Überprüfung der Wirksamkeit der Ankündigungen im Vordergrund. Im Rahmen des Versuchs wurde untersucht, wie frühzeitige Situationsankündigungen im Vergleich zu kurzfristigen Übernahmeaufforderungen die Blickverteilung zwischen der fahrfremden Tätigkeit und der Fahrsituation in Annäherung an Systemgrenzen beeinflussen und sich auf die Übernahmeleistung auswirken. Nach dem Erhalt einer Situationsankündigung wurden ein stärkeres Überwachungsverhalten und eine bessere Übernahmeleistung, beispielsweise durch einen frühzeitigeren Wechsel zum manuellen Fahren, erwartet. Außerdem sollte der Einfluss von Übernahmesituationen mit unterschiedlichen Anforderungen an die Fahraufgabe untersucht werden, weswegen verschiedene typische Übernahmeszenarien verwendet wurden (Gold, Naujoks et al., 2017). Sie unterschieden sich in den Fahrmanövern, die von den Probanden nach der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle ausgeführt werden mussten. Entweder mussten die Probanden einen Fahrstreifenwechsel ausführen oder das Fahrzeug lediglich in der Fahrspur halten (siehe Naujoks et al., 2014).

Neben der Untersuchung der Wirksamkeit von Situationsankündigungen in Übernahme-situationen ist von Interesse, ob sich die Präsenz von frühzeitigen Ankündigungen an Systemgrenzen auch auf das Verhalten *während* der automatisierten Fahrt auswirkt (d. h. wenn keine Systemgrenze bevorsteht). Eine Steigerung des Leistungsvermögens (beispielsweise durch die Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung von Systemgrenzen) von Automation ist mit einem stärkeren Vertrauen in das System assoziiert (Brown & Noy, 2004; Lee & See, 2004; Onnasch et al., 2014; siehe Kapitel 2.4). Die Messung von Vertrauen auf Automation wird typischerweise durch Verhaltensindikatoren wie dem Überwachungsverhalten operationalisiert (bspw. Kontrollblicke; siehe Hergeth et al., 2016). Erwartet wurde deshalb, dass Fahrer, die in Annäherung an potentielle Systemgrenzen eine Ankündigung erhielten, während der störungsfreien automatisierten Fahrt ein geringeres Überwachungsverhalten (bzw. eine stärkere Hinwendung zur fahrfremden Tätigkeit) zeigen würden (siehe Naujoks & Totzke, 2014; Parasuraman & Manzey, 2010), da sie sich darauf verlassen, dass Systemgrenzen stets rechtzeitig angekündigt werden. Um den Effekt des abnehmenden Überwachungsverhaltens bei steigendem Automationsgrad (Parasuraman, Mouloua, Molloy, & Hilburn, 1996; Parasuraman & Manzey, 2010) weiter zu untersuchen, wurden in der vorliegenden Studie verschiedene Systemumfänge der Automation miteinander verglichen. Während bei geringem Systemumfang die manuelle Kontrolle an Systemgrenzen während der Fahrt noch regelmäßig übernommen werden musste, bestand diese Notwendigkeit bei hohem Systemumfang nicht, da das System alle erforderlichen Manöver selbstständig ausführte. Bei hohem Systemumfang wurde während der automatisierten Fahrt ein geringeres Überwachungsverhalten, bedingt durch eine stärkere Zuwendung zur fahrfremden Tätigkeit, erwartet (de Winter et al., 2014; Carsten, Lai, Barnard, Jamson, & Merat, 2012; Feldhütter, Härtwig, Kurpiers, Mejia Hernandez, & Bengler, 2018; Large, Banks, Burnett, Baverstock, & Skrypchuk, 2017).

Hinsichtlich der Berücksichtigung von **Systemfehlern** zur gesamtheitlichen Evaluation der Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde in einem zweiten Studienteil untersucht, ob ein möglicherweise gesteigertes Vertrauen in die Automation (durch frühzeitige Ankündigungen und/oder einen gesteigerten Systemumfang) mit negativen Folgen bei der Reaktion auf einen Systemfehler einhergeht. Dazu erlebten die Fahrer am Versuchsende einen stillen Systemfehler, bei dem ein Hindernis nicht erkannt wurde und die Probanden aller Bedingungen selbst eingreifen mussten ohne eine vorherige Übernahmeaufforderung oder Ankündigung erhalten zu haben. In Bezug auf die Ankündigung wurde erwartet, dass Fahrer, die an den Erhalt von Ankündigungen gewöhnt waren, eine schlechtere Übernahmeleistung zeigen würden, weil sie den Systemfehler aufgrund einer geringeren Überwachungstätigkeit später entdeckten als Fahrer, die nie eine Ankündigung erhielten. In Bezug auf den Systemumfang wurde erwartet, dass Probanden, welche die Fahraufgabe nicht regelmäßig übernehmen mussten, aufgrund eines geringeren

Überwachungsverhaltens (de Winter et al., 2014) und fehlender Übung (Stanton & Marsden, 1996) eine schlechtere Übernahmeleistung zeigen würden.

3.1.2 Methodik

3.1.2.1 Versuchsumgebung

Die Studie wurde im dynamischen Fahr Simulator der WIVW GmbH durchgeführt (siehe Abbildung 4). Dieser besteht aus einem vollständig instrumentierten Fahrzeug-Mockup mit Automatikgetriebe im Inneren einer Simulatorkabine. Diese ist mit einem Bewegungssystem (Hexapod) und einem Sichtsystem ausgestattet. Am Lenkrad und an der Mittelkonsole befinden sich verschiedene Elemente zur Fahrzeugbedienung. LCD-Displays dienen als Außen- und Innenspiegel. Für die Anzeigen der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie des Tachometers wurde ein separates LCD-Display hinter dem Lenkrad angebracht. Zur Simulation der Fahrszenerie wird die Simulationssoftware SILAB® verwendet. Die Fahrszenerie wird über drei Projektoren mit einer Auflösung von 1400 x 1050 Bildpunkten auf eine Leinwand mit einem 180°-Sichtfeld projiziert. Das Simulationssystem besteht aus 15 Rechnern, die für unterschiedliche Komponenten der Simulation (z. B. grafische Darstellung, Streckensystem, andere Verkehrsteilnehmer, Sound) zuständig sind. Die Datenaufzeichnung erfolgt mit einer Rate von 100 Hz. Ein 5.1.-Soundsystem vermittelt einen dreidimensionalen Höreindruck und ermöglicht die akustische Ortung von anderen Verkehrsteilnehmern.



Abbildung 4: Außenansicht des Simulators (oben); Innenraum der Simulatorkabine (unten links) sowie Mockup und Projektionsfläche (unten rechts).

3.1.2.2 Versuchsdesign

Der Versuch wurde in einem between-within-Versuchsdesign mit den between-subjects-Faktoren „Systemumfang“ und „Situationsankündigung“ sowie dem within-subject-Faktor „Fahrsituation“ durchgeführt, die im Folgenden näher beschrieben werden.

3.1.2.2.1 Faktor „Systemumfang“

Der Systemumfang unterschied sich in der Fähigkeit der Automation, komplexe Fahrsituationen selbstständig bewältigen zu können und wurde im between-subjects-Design zweistufig variiert. Bei „hohem Systemumfang“ konnte die Automation automatisch, d. h. ohne die Notwendigkeit eines Fahrereingriffs, den Fahrstreifen wechseln, Überholvorgänge durchführen oder trotz fehlender oder unklarer Fahrbahnmarkierungen die Fahrspur halten. Für den „geringen Systemumfang“ stellten diese Situationen Systemgrenzen dar, die nicht vom System bewältigt werden konnten. Die Fahrer erhielten in diesen Situationen eine Übernahmeaufforderung, woraufhin sie die Fahrzeugkontrolle entweder vollständig übernehmen oder die laterale Fahrzeugkontrolle durch Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers deaktivieren konnten, um Fahrstreifenwechsel durchzuführen (siehe Kapitel 3.1.2.3 zur Gestaltung der Fahrzeugautomation).

3.1.2.2.2 Faktor „Situationsankündigung“

Der between-Faktor „Situationsankündigung“ wurde ebenfalls in zwei Stufen variiert: In der Annäherung an die untersuchten Verkehrssituationen (siehe Faktor „Fahrsituation“) wurde entweder eine Situationsankündigung ausgegeben oder nicht. Die Ankündigung bestand aus einer visuellen Anzeige sowie einem akustischen Hinweiston (siehe Kapitel 3.1.2.4, Abbildung 8). Sie wurde ca. 500 Meter (ca. 15 Sekunden bei 120 km/h) vor dem Ausgabezeitpunkt der dringlichen Übernahmeaufforderung bei geringem Systemumfang bzw. dem Ausführen des erforderlichen Fahrmanövers bei hohem Systemumfang ausgegeben. Der Zeitpunkt war vergleichbar mit Vorwarnzeitpunkten anderer Studien (vgl. Lapoehn et al., 2016; Miller et al., 2016). Aus der Kombination der beiden between-subjects-Faktoren ergaben sich vier verschiedene Systemvarianten, denen die Probanden zufällig zugeordnet wurden (siehe Abbildung 5).

		Situationsankündigung	
		Keine Ankündigung	Ankündigung
Systemumfang	Gering	Kontrollübernahme notwendig: Übernahmeaufforderung	Kontrollübernahme notwendig: Ankündigung + Übernahmeaufforderung
	Hoch	Automatische Manöverausführung	Automatische Manöverausführung: Ankündigung

Abbildung 5: Übersicht über den Versuchsplan mit den experimentellen between-subjects-Faktoren „Systemumfang“ und „Situationsankündigung“.

3.1.2.2.3 Faktor „Fahrsituation“

Während der Fahrt im Simulator mit einer der vier Systemvarianten erlebten die Fahrer vier unterschiedliche Fahrsituationen (within-subject, siehe Abbildung 6). Bei geringem Systemumfang stellten diese Situationen Systemgrenzen dar, die das Eingreifen bzw. die vollständige Kontrollübernahme durch den Fahrer erforderten, und in denen verschiedene Aspekte der Fahrzeugführung wie die Stabilisierung oder die Durchführung eines Spurwechselmanövers relevant waren (Michon, 1985). Bei hohem Systemumfang führte die Automation die erforderlichen Fahrmanöver selbstständig durch. Der Proband befand sich zu Beginn der Situationen immer auf dem rechten Fahrstreifen.

- **Fehlende Spurmarkierung:** Die Fahrstreifenmarkierung fehlten in einer langgezogenen Rechtskurve (Länge: 500 m), so dass der Fahrer in der Bedingung mit geringem Systemumfang bei ausbleibender Reaktion auf den benachbarten, dicht befahrenen Fahrstreifen abdriften würde. Mit Beginn der fehlenden Markierungen setzte ein Tempolimit von 100 km/h ein.
- **Baustelle:** Durch eine baustellenbedingte Blockade des linken Fahrstreifens fand eine Spurverschwenkung der drei Fahrstreifen statt (Länge: ca. 800 m), die durch gelbe Markierungen angezeigt wurde. Der ursprüngliche Fahrstreifen des Probanden wurde auf den Standstreifen umgeleitet. Bei ausbleibender Fahrerreaktion in der Bedingung mit geringem Systemumfang geriet das Probandenfahrzeug auf den benachbarten, dicht befahrenen Fahrstreifen. Mit Beginn der Verschwenkung setzte ein Tempolimit von 100 km/h ein.
- **Spurwegfall:** Die Fahrbahn wurde von drei auf zwei Fahrstreifen verringert (Länge: 2.5 km), so dass ein Wechsel auf den mittleren Fahrstreifen notwendig war, auf dem sich keine anderen Verkehrsteilnehmer befanden. Bei ausbleibendem Spurwechsel in der Bedingung mit geringem Systemumfang kollidierte das Fahrzeug mit einem Absperrungsschild.
- **Hindernis:** Der rechte Fahrstreifen wurde von einem liegen gebliebenen Pannen-LKW blockiert, so dass ein Spurwechsel auf den mittleren Fahrstreifen notwendig war, der frei von

Verkehr war. Aufgrund der einsetzenden ACC-Verzögerung⁶ (Abstand zum LKW: ca. 350 m) verzögerte das Probandenfahrzeug in der Annäherung in beiden Systemumfangsbedingungen. Die Geschwindigkeit im Moment der Übernahmeaufforderung bzw. Manöverausführung betrug ca. 106 km/h.

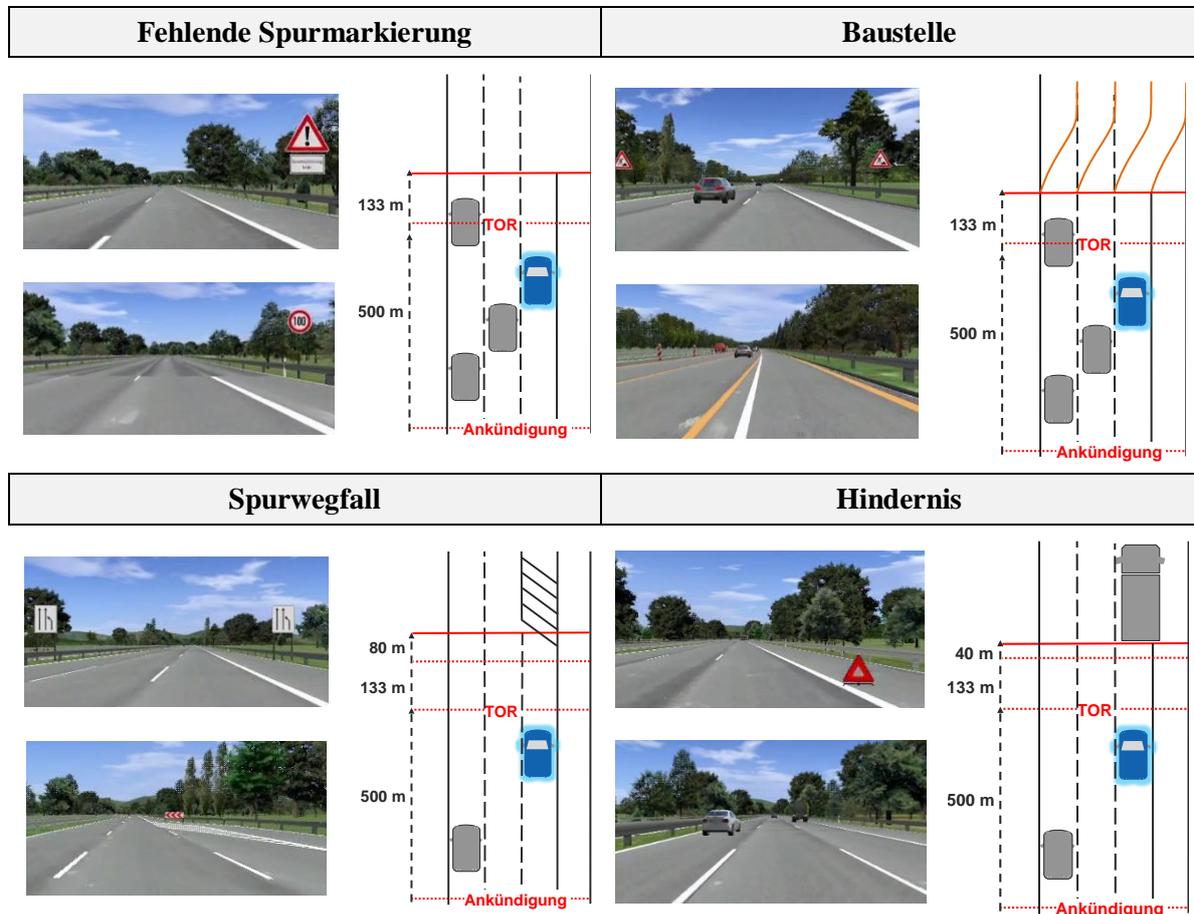


Abbildung 6: Übersicht über die Fahrsituationen.

3.1.2.2.4 Fehlerfall: Nicht-Erkennen eines Hindernisses

Nach Erleben der vier Fahrsituationen erkannte das automatisierte System am Ende der Fahrt ein liegengebliebenes Fahrzeug nicht. In allen Bedingungen blieben die ACC-Verzögerung und die Systemausgaben, d. h. Situationsankündigungen und Übernahmeaufforderungen aus. Bei hohem Systemumfang leitete die Automation keinen Spurwechsel ein. Die Notwendigkeit zur Übernahme wurde in keiner Bedingung kommuniziert. Die Probanden mussten in allen Fällen die Notwendigkeit des Eingriffs selbst erkennen, die manuelle Fahrzeugkontrolle übernehmen und dem Hindernis ausweichen, um eine Kollision zu verhindern (Wiederholung des Szenarios

⁶ ACC = Adaptive Cruise Control (dt. Abstandsregeltempomat); diese Systemkomponente beschreibt die Übernahme der longitudinalen Fahrzeugkontrolle (d. h. Geschwindigkeits- und Abstandshaltung).

„Hindernis“ ohne Ankündigung, Übernahmeaufforderung oder Manöverausführung, siehe Lu et al., 2019, für einen ähnlichen Versuchsaufbau).

3.1.2.3 Gestaltung der Fahrzeugautomation

Die Automation konnte durch Betätigung einer Lenkradtaste aktiviert werden, woraufhin sie in allen Systemvarianten die laterale und longitudinale Fahrzeugkontrolle übernahm (d. h. Halten einer systembedingten Geschwindigkeit von 120 km/h, Regeln auf Geschwindigkeitsbegrenzungen, Spurmittenzentrierung und Abstandshaltung zu Vorderfahrzeugen). Die Systemdeaktivierung konnte durch Betätigung der Bremse⁷, eines Lenkrucks⁸ oder erneuter Betätigung der Lenkradtaste erfolgen.

Um bei **geringem Systemumfang** Fahrstreifenwechsel oder Überholvorgänge durchzuführen, konnte neben der Möglichkeit zur vollständigen Deaktivierung die laterale Kontrolle durch Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers temporär deaktiviert werden. Die longitudinale Kontrolle blieb währenddessen aktiv. Im Falle einer Systemgrenze wurde die Übernahmeaufforderung in Situationen ohne Spurwechselnotwendigkeit vier Sekunden vor Erreichen der fehlenden Markierungen bzw. der Spurverschwenkung ausgegeben, was bei einer Systemgeschwindigkeit von 120 km/h einem Abstand von ca. 133 Meter entsprach. Bei ausbleibender Fahrerreaktion auf die Übernahmeaufforderung schaltete sich das System nach Ablauf von 3.5 Sekunden automatisch ab. In Situationen mit der Notwendigkeit zum Spurwechsel wurde der Abstand zur Fahrsituation um 80 Meter (Spurwegfall) bzw. 40 Meter (Hindernis) erweitert, um nach Ablauf der vier Sekunden noch eine Kollision mit einem Objekt in Längsrichtung durch eine Vollverzögerung verhindern zu können.⁹ Wurde die Automation deaktiviert, war sie bis zum Passieren der Systemgrenze nicht mehr verfügbar.

Bei **hohem Systemumfang** wurden alle Situationen (Ausnahme: Fehlersituation) von der Automation gelöst, indem das System Fahrstreifen wechselte, automatische Überholmanöver ausführte oder der erforderlichen Spurführung folgte. Die Initiierung der Fahrmanöver in den Spurwechselszenarien geschah in etwa zum gleichen Zeitpunkt, zu dem die Ausgabe der Übernahmeaufforderung in der Bedingung mit geringem Systemumfang erfolgte.

⁷ Schwellwert: 10% des maximalen Bremspedalwegs

⁸ Schwellwert: 0.5 rad pro Sekunde

⁹ Durch die vorher einsetzende ACC-Verzögerung in der Situation „Hindernis“ war in dieser Situation die Geschwindigkeit bei Ausgabe der Übernahmeaufforderung reduziert.

3.1.2.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Reichling, 2015) in Anlehnung an bereits bestehende Anzeigekonzepte beim automatisierten Fahren unter Berücksichtigung relevanter Gestaltungsrichtlinien entwickelt, überarbeitet und in einer Simulatorstudie evaluiert. Die verschiedenen Systemzustände (z. B. verfügbar, aktiv, Situationsankündigung, Übernahmeaufforderung) wurden den Probanden über mehrere Anzeigeelemente vermittelt (siehe Abbildung 7).

- **Anzeige im Kombi-Instrument:** Die Darstellung des aktiven Systemzustands erfolgte über eine Anzeige aus Linienmarkierungen und Abstandsbalken für die aktive Quer- und Längsregelung. Eine Textanzeige verbalisierte den Zustand (z. B. „verfügbar“; „aktiv“).
- **LED-Leiste in der Windschutzscheibenwurzel:** Um den Systemzustand auch im peripheren Sichtfeld wahrnehmen zu können, wurde dieser über eine LED-Leiste in der Windschutzscheibenwurzel vermittelt (z. B. grün für „aktives System“; orange für „Ankündigung“; rot für „Übernahmeaufforderung“).
- **Auditive Ausgaben:** Ein Wechsel der Systemzustände war mit einer akustischen Rückmeldung verbunden.



Abbildung 7: Mensch-Maschine-Schnittstelle im aktiven Systemmodus.

Die bei geringem Systemumfang erforderliche Kontrollübernahme wurde durch eine visuelle **Übernahmeaufforderung** vermittelt (siehe Abbildung 8, oben), die von einem dringlichen Ton und einem Farbwechsel der LED-Leiste begleitet wurde.

In der Bedingung mit **Situationsankündigung** wurde der Grund für eine bevorstehende Übernahme bzw. für ein automatisches Fahrmanöver (z. B. Baustelle) in Form eines situationsspezifischen Piktogramms dargestellt und von einer Textmeldung begleitet. Zum Präsentationszeitpunkt wechselte die Farbe der LED-Leiste von grün auf orange und ein Hinweiston wurde ausgegeben (siehe Abbildung 8, unten).

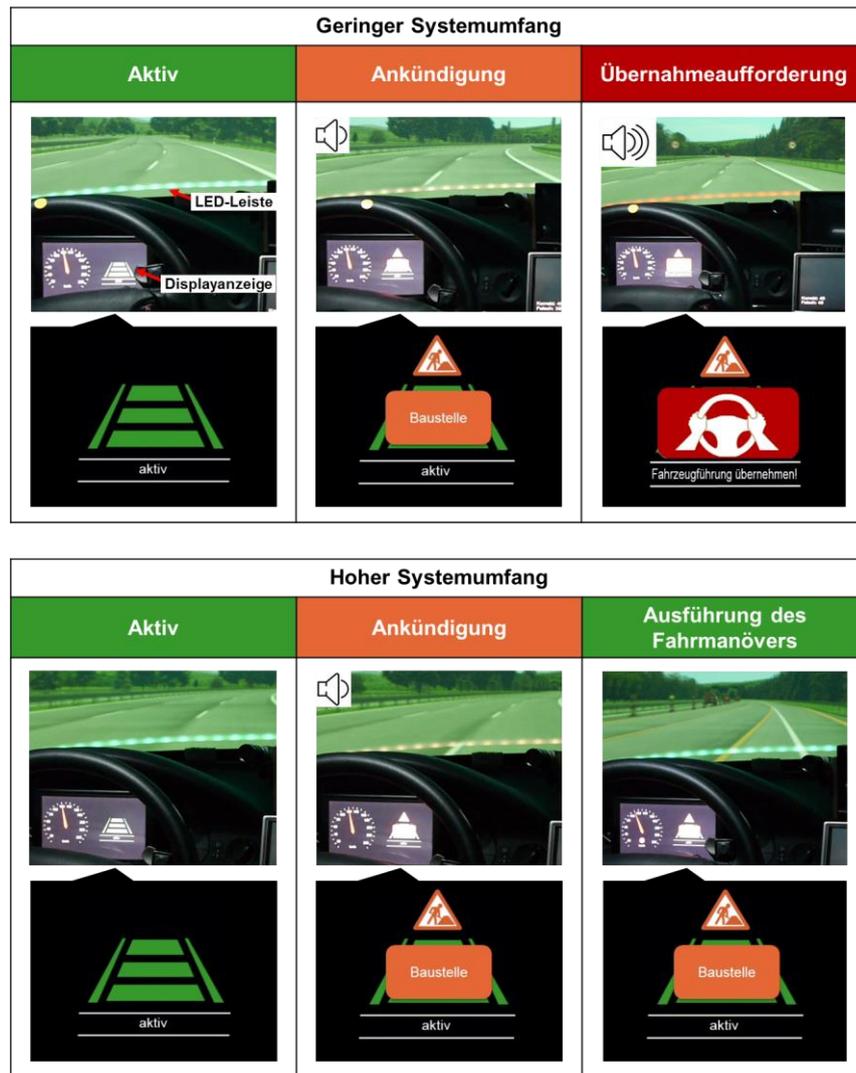


Abbildung 8: Mensch-Maschine-Schnittstelle bei geringem (oben) und hohem (unten) Systemumfang im Beispielszenario „Baustelle“. Ankündigungsanzeige (Mitte) nur in Bedingung mit Ankündigung.

3.1.2.5 Fahrfremde Tätigkeit

Während der automatisierten Fahrt sollten die Fahrer eine visuell-kognitiv-motorische Aufgabe ausführen. Dazu wurde eine RSVP-Aufgabe (engl. für *rapid-serial-visual-presentation*, Broadbent & Broadbent, 1987) verwendet, bei der auf visuell dargebotene *Targets* (Ziffern) mit einem Tastendruck im Bereich der Armstütze reagiert werden musste. Die *Targets* erschienen mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit zwischen in schneller Abfolge präsentierten *Distraktoren* (Buchstaben) auf einem Display in der Mittelkonsole. Die Aufgabe sollte zu einer Blickabwendung von der Verkehrsumgebung führen, aber die Möglichkeit zur Ausführung von Kontrollblicken auf die Straße bieten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Spezifikationen der verwendeten Parameter und den Anzeigort der Aufgabe.

Insgesamt gab es über die Fahrt verteilt 21 Aufgaben unterschiedlicher Länge (Dauer zwischen 30 und 55 Sekunden). Die Probanden wurden instruiert, die Aufgabe zu bearbeiten, wenn sie angeboten wurde (angekündigt durch Sprachausgabe „Nebenaufgabe beginnt“). In Annäherung an die (Übernahme-)Situationen sowie die Fehlersituation wurde immer eine Aufgabe angeboten (Beginn vor dem theoretischen Zeitpunkt der Situationsankündigung). Die Dauer der Aufgabe reichte dabei immer über die Situation hinaus, so dass die Aufgabenbearbeitung im Fall eines Übernahmeerfordernisses unterbrochen werden musste. Die Anzahl der Aufgaben zwischen den (Übernahme-)Situationen variierte, so dass das Vorkommen eines Ereignisses nicht aus der Aufgabenanzahl abgeleitet werden konnte. Um die Motivation der Aufgabenbearbeitung zu steigern, erhielten die Probanden für eine hohe Trefferanzahl und eine geringe Fehlerrate – die Anzahl der erzielten korrekten und verpassten Targets wurde auf dem Display angezeigt – am Versuchsende eine monetäre Belohnung. Die Priorität der Fahraufgabe gegenüber der Aufgabenbearbeitung wurde betont, indem der Verlust aller erzielten Punkte drohte, wenn es während der Fahrt zu einem kritischen Fahrereignis kam.

Tabelle 1: Übersicht über die Parameter und Anzeigeort der fahrfremden Tätigkeit.

Parameter	Spezifikation
Itempräsentationszeit	400 ms
Präsentationsdauer der Rückmeldung (rotes „X“ für falsche/zu späte/keine Antwort; grünes „O“ für korrekte/rechtzeitige Antwort)	400 ms
Zeit zwischen zwei Items	100 ms
Zeit für mögliche Antwort	1500 ms
Sequenzlänge	variierend
Targetwahrscheinlichkeit	10%
Targets	2, 3, 4, 5, 6, 9
Distraktoren	B, C, D, E, F, J, K, L, M, N, P, R, S, T, Y, X, Z



3.1.2.6 Versuchssituationen

3.1.2.6.1 Hauptversuch

Die Strecke bestand aus einer dreispurigen Autobahn ohne generelle Geschwindigkeitsbeschränkung mit kurvigen und geraden Fahrtabschnitten. Zwischen den (Übernahme-)Situationen befanden sich Abschnitte, in denen die Automation in beiden Stufen des Systemumfangs ohne die Notwendigkeit eines Fahrereingriffs genutzt werden konnte („Freie Fahrt“; Länge: ca. 5.5 km). Währenddessen befanden sich Fahrzeuge auf den benachbarten Fahrstreifen, die mit ca. 170 km/h (linke Spur) bzw. 150 km/h (mittlere Spur) fuhren. Zusätzlich gab es eine Folgefahrt sowie zwei Abschnitte mit Überholvorgängen langsamerer Fahrzeuge, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

3.1.2.6.2 Fehlerfall

Am Ende der Hauptfahrt wurden die Fahrer erneut mit dem Szenario „Hindernis“ (siehe Kapitel 3.1.2.2.4) konfrontiert, ohne dass der Pannen-LKW vom System erkannt wurde.

Zur Kontrolle von Reihenfolgeeffekten gab es zwei Permutationsreihenfolgen, in denen die Versuchssituationen durchfahren wurden. Um den Einfluss von Übungseffekten auf die Bewältigung der Fehlersituation zu kontrollieren, wurde die Position der Situation „Hindernis“ in beiden Permutationen konstant gehalten. Zwischen den Situationen lagen zwischen 7 und 15 km. Die Gesamtlänge der Versuchsstrecke betrug ca. 60 km.

3.1.2.7 Abhängige Variablen

Im Folgenden werden die abhängigen Variablen des Versuchs dargestellt. In der Bedingung des hohen Systemumfangs fanden während der regulären Fahrt keine Übernahmesituationen statt, weswegen der hohe Systemumfang nur bei den Blickverhaltensmaßen sowie im Fehlerfall analysiert wird.

3.1.2.7.1 Zeitliche Aspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Zeitliche Aspekte der Übernahme wurden auf mehreren Ebenen analysiert, die den Prozess der Wiedererlangung der Fahrzeugkontrolle durch die erforderliche Erstreaktion (Zeitpunkt der Handerkennung), Entscheidung zur Übernahme (Deaktivierungszeitpunkt) und Ausführung des notwendigen Fahrmanövers (Manöverzeitpunkt) charakterisieren. Die Hauptfragestellung der Studie bestand in der Untersuchung, ob Fahrer durch frühzeitige Informationen zur Systemgrenze dabei unterstützt werden, den Übergang zum manuellen Fahren vorzubereiten und beispielsweise früher übernehmen als Fahrer, die nur eine Übernahmeaufforderung erhielten. Da die *Reaktionsschnelligkeit* auf die Ankündigung in diesem Zusammenhang weniger relevant ist, als der Abstand zur Systemgrenze, bei dem die Fahrer übernehmen, werden die zeitlichen Variablen der Übernahme in dieser Arbeit als Meterabstand zur jeweiligen Systemgrenze angegeben. Als Systemgrenze wird der Streckenpunkt bezeichnet, zu dem eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben worden wäre.

- **Zeitpunkt der Handerkennung:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Hände ans Lenkrad nehmen.
- **Deaktivierungszeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Querführung durch Blinkerbetätigung deaktivieren, um Spurwechsel durchzuführen, die Automation vollständig deaktivieren, oder sich die Automation 3.5 Sekunden nach Ausgabe einer Übernahmeaufforderung bei ausbleibendem Fahrereingriff automatisch abschaltet.

- **Manöverzeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem sich der Schwerpunkt des simulierten Probandenfahrzeugs bei einem erforderlichen Fahrstreifenwechsel erstmalig auf dem benachbarten Fahrstreifen befindet.

3.1.2.7.2 Qualitätsaspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Zur Beurteilung der Übernahmequalität wurden die maximale Längs- und Querb beschleunigung sowie die minimale Time-to-collision herangezogen.

- **Maximale Längsverzögerung:** Maximal aufgetretene Längsverzögerung [m/s^2] innerhalb 10 Sekunden nach dem Deaktivierungszeitpunkt (Naujoks et al., 2019).
- **Maximale Querb beschleunigung:** Maximal aufgetretene Querb beschleunigung [m/s^2] innerhalb 10 Sekunden nach dem Deaktivierungszeitpunkt (Pampel et al., 2019).
- **Minimale Time-to-collision (TTC)¹⁰:** Minimale Zeit bis zur Kollision mit dem stehenden Hindernis innerhalb 10 Sekunden nach dem Deaktivierungszeitpunkt.

3.1.2.7.3 Blickverhalten

Das Blickverhalten gibt Aufschluss über die Überwachungstätigkeit des Fahrers. Es wird auch für den hohen Systemumfang dargestellt. Die Aufzeichnung erfolgte über ein kamerabasiertes Blickerfassungssystem, aufgrund nicht ausreichender Qualität der Datenaufzeichnung wurden die Blicke jedoch manuell nachkodiert.

- **Prozentuale Blickverteilung:** Um die Auswirkungen der Situationsankündigung und des Systemumfangs auf das Überwachungsverhalten der Fahrer zu untersuchen, wurde der prozentuale Anteil an Kontrollblicken auf die Fahrsituation (d. h. Fahrbahn- oder Spiegelblicke; vgl. van der Heiden et al., 2017) in zwei Zeitbereichen analysiert: (1) **Freie Fahrt:** Blickverteilung gemittelt über Abschnitte mit fahrfremder Tätigkeit ohne (Übernahme-)Situation. (2) **Annäherung an (Übernahme-)Situation:** Blickverteilung gemittelt für den Zeitraum von 500 Meter vor der (theoretischen) Übernahmeaufforderung bzw. Manöverausführung.
- **Anzahl und Länge von Kontrollblicken:** Um den Prozess der Abwendung von der fahrfremden Tätigkeit hin zur Fahraufgabe besser charakterisieren zu können, wurde die Anzahl und Länge der Kontrollblicke während der Annäherung an die Fahrsituation im Zeitraum von 500 Meter vor der (theoretischen) Übernahmeaufforderung bzw. Manöverausführung analysiert.

¹⁰ Da sich das Hindernis nicht bewegt, entspricht die TTC in diesem Fall dem Sekundenabstand.

3.1.2.7.4 Selbstbericht

Nach Erleben jeder Übernahmesituation schätzten die Fahrer die Kritikalität der Situation („Wie bewerten Sie die Situation?“, siehe Abbildung 9) auf der 11-stufigen „Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen“ ein (Neukum, Lübbeke, Krüger, Mayser, & Steinle, 2008).

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Abbildung 9: Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen (Neukum et al., 2008).

3.1.2.8 Stichprobe

N = 32 Fahrer nahmen an dem Versuch teil (männlich = 21; weiblich = 11). Das Durchschnittsalter betrug 33,22 Jahre (SD = 10,22 Jahre, Altersspanne 22-54 Jahre; jährliche Fahrleistung: M = 17000, SD = 12801). Alle Teilnehmer wurden aus dem WIVW-Testfahrerpanel rekrutiert, welches die Festlegung bestimmter Ein- und Ausschlusskriterien erlaubt. Die Testfahrer werden vor Aufnahme in das Panel ausführlich im Simulator trainiert (Hoffmann & Buld, 2006), um einen geübten Umgang mit dem Simulator sicherzustellen und das Auftreten von Simulatorübelkeit zu reduzieren. Eine Systemvariante wurde von n = 8 Probanden erlebt.

3.1.2.9 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung und dem Ausfüllen der Datenschutzerklärung erfolgte eine kurze Erklärung zum Versuchsablauf. Anschließend absolvierten alle Teilnehmer eine kurze Eingewöhnungsfahrt im Simulator, bei der die Systembedienung inklusive eines fahrerinitiierten Spurwechsels aus dem aktiven Systemzustand heraus geübt wurde und die Erklärung der Situationsbewertungsskala erfolgte. Anschließend wurden die Probanden je nach Versuchsbedingung über die Funktionsweise des Systems mit geringem bzw. hohem Systemumfang aufgeklärt. Die Fahrer des hohen Systemumfangs erhielten die Information, dass ihr System alle Fahrsituationen bewältigen könnte. Die Fahrer des geringen Systemumfangs wurden darüber informiert, dass ihr System gewisse Situationen nicht bewältigen könne und es sie in diesen Fällen zur manuellen

Kontrollaufnahme auffordern würde. Weiterhin erhielten sie die Information, dass die Ausführung von automatischen Spurwechseln und Überholvorgängen nicht im Systemumfang enthalten sei und sie diese Manöver selbst ausführen müssten. Für den geringen Systemumfang wurden die Probanden instruiert, aufgrund auftretender Übernahmesituationen die Verkehrssituation zu überwachen,¹¹ was bei hohem Systemumfang nicht erforderlich war. Die Fahrer der Varianten mit Situationsankündigung erhielten im Vorfeld keine Information darüber, dass sie eine Ankündigung erhalten würden. Da die Erfahrung mit Übernahmesituationen einen Einfluss auf die Übernahmeleistung hat (siehe bspw. Gold, 2016; Körber et al., 2016; Wandtner, 2018), sollte es sich bei der Messfahrt nicht um den Erstkontakt mit dem System handeln. Deswegen fand im Vorfeld eine ausführliche Kennenlernfahrt der jeweiligen Systemvariante statt, in der dieselben Situationen wie in der Hauptfahrt (Ausnahme: Fehlersituation) erlebt wurden. Eine fahrfremde Tätigkeit wurde während der Kennenlernfahrt nicht bearbeitet. Auswertungen zum Aufbau von Automationsvertrauen während der Kennenlernfahrt finden sich in Mai (2015). Vor der Hauptfahrt wurde die fahrfremde Tätigkeit erklärt und geübt. Der Versuch dauerte insgesamt ca. 2 Stunden.

3.1.3 Ergebnisse

3.1.3.1 Vorgehen bei der Datenauswertung

Die Analyse ist in Ergebnisse zur regulären Fahrt (= korrektes Systemverhalten, Studienteil A) und zum Fehlerfall (= Ausbleiben der Systemausgaben und -reaktion bei nicht-erkanntem Hindernis, Studienteil B) gegliedert. Es wird ein generelles Signifikanzniveau von .05 angenommen, Nachtests werden nach Bonferroni adjustiert. Post-hoc-Tests zwischen Einzelbedingungen werden nur dann uneingeschränkt interpretiert, wenn der zugehörige vollfaktorielle Globaltest signifikant ist. Signifikante Effekte werden grafisch dargestellt.

Für die inferenzstatistische Auswertung von Studienteil A wurde pro abhängiger Variable eine vollfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den between-Faktoren „Systemumfang“ (hoch vs. gering)¹² und „Situationsankündigung“ (Ankündigung vs. keine Ankündigung) sowie dem within-Faktor „Fahrsituation“ (fehlende Spurmarkierung vs. Baustelle vs. Spurwegfall vs. Hindernis) durchgeführt. Für within-subject-Faktoren werden stets multivariate Statistiken berichtet, für between-subjects-Faktoren univariate Statistiken. Im Hinblick auf den Faktor „Fahrsituation“

¹¹ Dies stellt eine Abweichung zur Definition eines L3 Systems nach SAE 2018 dar.

¹² Bei den zeitlichen und qualitativen Übernahmeparametern in Studienteil A entfällt dieser Faktor, da bei hohem Systemumfang kein Übernahmefordernis bestand.

werden nur signifikante Interaktionen, nicht aber die Haupteffekte berichtet, da diesbezüglich keine Hypothesen bestanden. Die Annahme der Gleichheit der Kovarianzmatrizen wurde mit dem Box-Test geprüft. Diese Annahme ist in zwei von neun relevanten Tests verletzt. Da die Probanden auf die Gruppen gleich verteilt sind, kann diese Verletzung vernachlässigt werden (Field, 2009). Die Gleichheit der Fehlervarianzen wurde mit dem Levene-Test geprüft. Eine Verletzung der Annahme wurde in 3 von 35 relevanten Tests gefunden. Aufgrund der gleich verteilten Probanden auf die Experimentalgruppen kann auch diese Verletzung als vernachlässigbar angesehen werden (Field, 2009). Die Normalverteilungsannahme, geprüft mit dem K-S-Test, kann in den meisten Fällen angenommen werden. In 6 von 35 relevanten Fällen ist laut K-S-Test eine Abweichung gegeben. Da Varianzanalysen generell robust gegen die Verletzung der Normalverteilung sind, wenn die Experimentalgruppen ähnlich groß sind (Howell, 2007), wurde von einer Transformation der Werte abgesehen. Weiterhin wurde das Datenset nach Extremwerten durchsucht (± 3 Standardabweichungen außerhalb des Gruppenmittelwerts). Über alle Tests wurden insgesamt sechs Extremwerte identifiziert. Aufgrund des within-Designs wurden diese im Datenset belassen, um die Stichprobe nicht weiter zu reduzieren.

Für die Analyse der Fehlerfahrt wurde pro abhängiger Variable eine univariate, vollfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit den between-Faktoren „Systemumfang“ (hoch vs. gering) und „Situationsankündigung“ (Ankündigung vs. keine Ankündigung) durchgeführt. Die Voraussetzung der Gleichheit der Fehlervarianzen kann auf Basis des Levene-Tests in den meisten (8 von 11) Tests angenommen werden. Die Normalverteilungsannahme war hingegen in allen durchgeführten Tests verletzt. Da Extremwerte lediglich in einem der Tests auftraten (± 3 Standardabweichungen außerhalb des Gruppenmittelwerts) und die Probanden gleich verteilt waren, wurden die Tests ohne zusätzliche Maßnahmen durchgeführt.

3.1.3.2 Studienteil A: Reguläre Fahrt

3.1.3.2.1 Zeitpunkt der Handerkennung

In einem Fall der Bedingung mit Ankündigung hat ein Proband die Hände schon vor Ausgabe der Situationsankündigung am Lenkrad, weswegen er keinen Wert für die Variable „Zeitpunkt der Handerkennung“ produziert.

Alle Haupteffekte der ANOVA sowie die Interaktion aus Situation und Ankündigung sind statistisch signifikant. Die Ankündigung führt dazu, dass die Probanden in den Übernahme-situationen die Hände frühzeitiger zurück ans Lenkrad nehmen (siehe Abbildung 10 und Tabelle 2). Post-hoc-Tests zwischen den Ankündigungs-Bedingungen auf Situationsebene zeigen, dass die Probanden ihre Hände bei Ankündigung in den Situationen „Baustelle“ und „Hindernis“, nicht aber „fehlende Markierung“ und „Spurwegfall“ früher ans Lenkrad nehmen als ohne Ankündigung (siehe Tabelle 3). Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, nehmen auch die Fahrer der Bedingung ohne Ankündigung die Hände im Mittel vor der Ausgabe einer Übernahmeaufforderung (Streckenmeter 0 in der Grafik) ans Lenkrad.

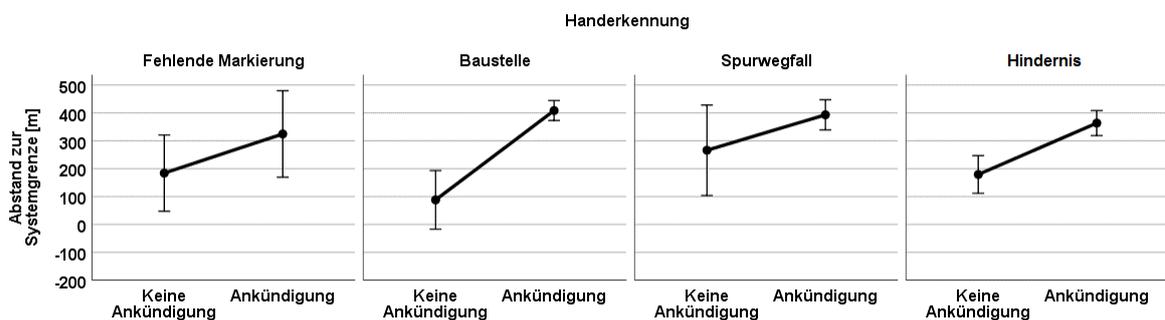


Abbildung 10: Zeitpunkt der Handerkennung, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 2: ANOVA Zeitpunkt der Handerkennung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	4.87	3	11	.021	0.57
Situation * Ankündigung	11.56	3	11	.001	0.76
Ankündigung	12.34	1	13	.004	0.49

Tabelle 3: T-Tests Zeitpunkt der Handerkennung, Effekt der Ankündigung getrennt nach Situation. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0125.

Situation	Effekt	T	df	p
Fehlende Markierung	Ankündigung	1.61	14	.131
Baustelle	Ankündigung	6.83	14	<.001
Spurwegfall	Ankündigung	1.76	14	.101
Hindernis	Ankündigung	5.25	13	<.001

3.1.3.2.2 Deaktivierungszeitpunkt

Abbildung 11 stellt den Deaktivierungszeitpunkt (vollständige Deaktivierung oder Deaktivierung der Querführung) dar. Die Auswirkung der Ankündigung auf den Deaktivierungszeitpunkt hängt von der jeweiligen Fahrsituation ab (Interaktion Situation und Ankündigung, siehe Tabelle 4). Post-hoc-Tests getrennt nach Situation zeigen, dass die Ankündigung in der Situation „Hindernis“ eine frühzeitigere Deaktivierung bewirkt und sich in der Situation „Spurwegfall“ eine Tendenz zu einer frühzeitigeren Deaktivierung zeigt (siehe Tabelle 5). Nach Adjustierung des Signifikanzniveaus sind jedoch beide Effekte nicht mehr statistisch signifikant.

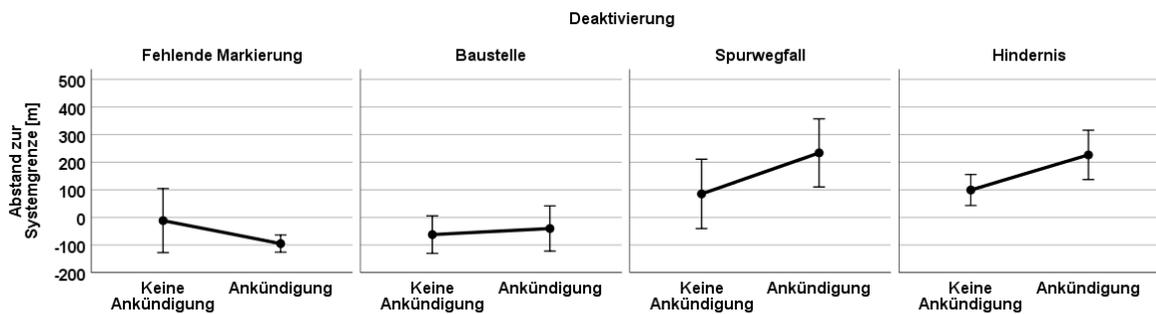


Abbildung 11: Deaktivierungszeitpunkt, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 4: ANOVA Deaktivierungszeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Situation	18.14	3	12	<.001	0.82
Situation * Ankündigung	4.18	3	12	.031	0.51
Ankündigung	1.98	1	14	.181	0.12

Tabelle 5: T-Tests Deaktivierungszeitpunkt, Effekt der Ankündigung getrennt nach Situation. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0125.

Situation	Effekt	T	df	p
Fehlende Markierung	Ankündigung	-1.64	14	.124
Baustelle	Ankündigung	0.49	14	.631
Spurwegfall	Ankündigung	2.00	14	.066
Hindernis	Ankündigung	2.86	14	.013

3.1.3.2.3 Manöverzeitpunkt

In den Situationen, die einen Spurwechsel erfordern („Hindernis“ und „Spurwegfall“), wechseln Fahrer mit Ankündigung früher die Spur als Fahrer ohne Ankündigung (Haupteffekt Ankündigung, siehe Abbildung 12 und Tabelle 6). Der Haupteffekt Situation und die Interaktion aus Situation und Ankündigungsbedingung sind nicht statistisch signifikant.

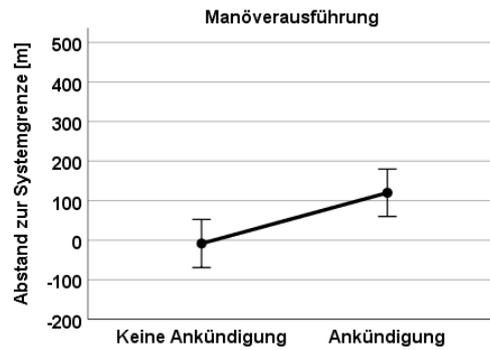


Abbildung 12: Manöverzeitpunkt (gemittelt für Hindernis und Spurwegfall), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 6: ANOVA Manöverzeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	0.07	1	14	.789	0.01
Situation * Ankündigung	0.07	1	14	.800	0.01
Ankündigung	7.05	1	14	.019	0.34

3.1.3.2.4 Qualitätsaspekte der Übernahme

Bei der **maximalen Längsverzögerung** bzw. **Querbescleunigung** zeigt sich kein signifikanter Effekt der Ankündigung sowie keine Interaktion aus Situation und Ankündigung (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8). In Bezug auf die **minimale TTC** in der Situation „Hindernis“¹³ finden sich höhere Werte bei Ankündigung, was einer geringeren objektiven Situationskritikalität entspricht (siehe Abbildung 13 und Tabelle 9).

Tabelle 7: ANOVA maximale Längsverzögerung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	30.52	3	12	<.001	0.88
Situation * Ankündigung	0.98	3	12	.437	0.20
Ankündigung	0.26	1	14	.617	0.02

Tabelle 8: ANOVA maximale Querbescleunigung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	2.96	3	12	.075	0.43
Situation * Ankündigung	0.21	3	12	.885	0.05
Ankündigung	1.89	1	14	.191	0.12

¹³ Nur in dieser Situation musste einem stehenden Hindernis auf der eigenen Fahrspur ausgewichen werden. In den anderen Situationen existieren deswegen keine TTC min-Werte.

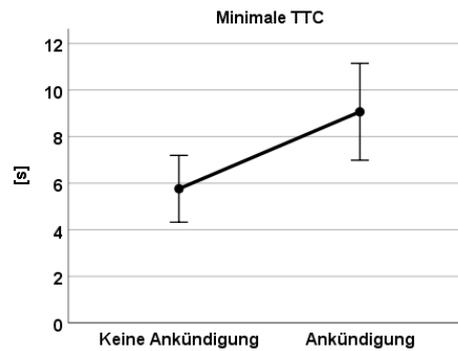


Abbildung 13: Minimale TTC in Situation „Hindernis“, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 9: T-Test minimale TTC, Effekt der Ankündigung für Situation „Hindernis“.

Situation	Effekt	T	df	p
Hindernis	Ankündigung	-3.09	14	.008

3.1.3.2.5 Prozentuale Blickverteilung in freien Fahrten und in Annäherung an (Übernahme-)Situation

Aufgrund ungenügender Qualität der Videodaten müssen zwei Fahrer von der Auswertung ausgeschlossen werden. In einem ersten Schritt wird eine vollfaktorielle ANOVA mit den unabhängigen Variablen Ankündigung, Systemumfang und Situation für die **freien Fahrten** berechnet (d. h. Fahrabschnitte ohne Notwendigkeit der Übernahme oder Manöverausführung, siehe Tabelle 10).¹⁴ Dabei haben weder der Systemumfang noch die Ankündigungsbedingung einen signifikanten Einfluss auf die prozentuale Blickverteilung der Probanden in diesen Fahrabschnitten.

Tabelle 10: ANOVA prozentualer Anteil an Kontrollblicken, freie Fahrten.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	1.30	3	24	.296	0.14
Situation * Systemumfang	0.45	3	24	.720	0.05
Situation * Ankündigung	0.11	3	24	.956	0.01
Situation * Systemumfang * Ankündigung	0.81	3	24	.503	0.09
Systemumfang	1.42	1	26	.244	0.05
Ankündigung	3.56	1	26	.070	0.12
Systemumfang * Ankündigung	0.05	1	26	.822	0.00

Die Analyse des Abschnitts der **Annäherung an (Übernahme-)Situations** ergibt einen signifikanten Haupteffekt des Systemumfangs (siehe Tabelle 11), jedoch keinen signifikanten Effekt der Ankündigungsbedingung und der Interaktion aus Ankündigung und Systemumfang. Wie aus Abbildung 14 erkennbar, ist der Anteil an Kontrollblicken bei geringem Systemumfang in Vorbereitung auf die Übernahmesituation höher als bei hohem Systemumfang.

¹⁴ Da sich die freien Fahrten zwischen den (Übernahme-)Situations befanden, wurde der Faktor „Situation“ in der Analyse mitbetrachtet, um mögliche Einflüsse der Versuchssituation erfassen zu können.

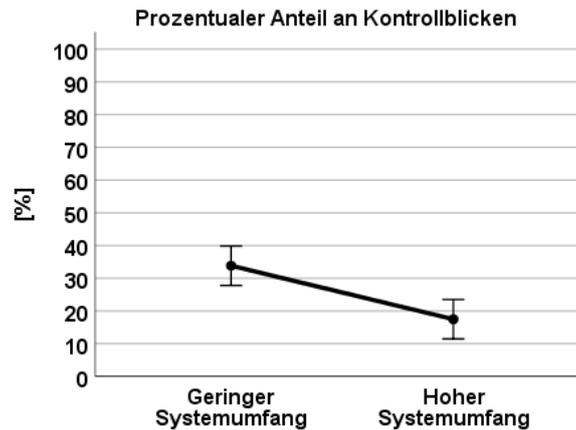


Abbildung 14: Prozentualer Anteil an Kontrollblicken, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall; Annäherung an (Übernahme-)Situation.

Tabelle 11: ANOVA prozentualer Anteil an Kontrollblicken, Annäherung an (Übernahme-)Situation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Situation	5.62	3	24	.005	0.41
Situation * Systemumfang	2.23	3	24	.110	0.22
Situation * Ankündigung	1.95	3	24	.148	0.20
Situation * Systemumfang * Ankündigung	1.02	3	24	.403	0.11
Systemumfang	15.55	1	26	.001	0.37
Ankündigung	0.75	1	26	.393	0.03
Systemumfang * Ankündigung	2.73	1	26	.111	0.10

3.1.3.2.6 Anzahl und Länge der Kontrollblicke in Annäherung an (Übernahme-)Situation

In einem nächsten Schritt werden die Kontrollblicke in Annäherung an die potentielle Systemgrenze näher analysiert. In Bezug auf die **Anzahl von Kontrollblicken** zeigen sich dabei unabhängig von Fahrsituation und Ankündigungsbedingung signifikant mehr Kontrollblicke bei geringem als bei hohem Systemumfang (siehe Abbildung 15 und Tabelle 12).

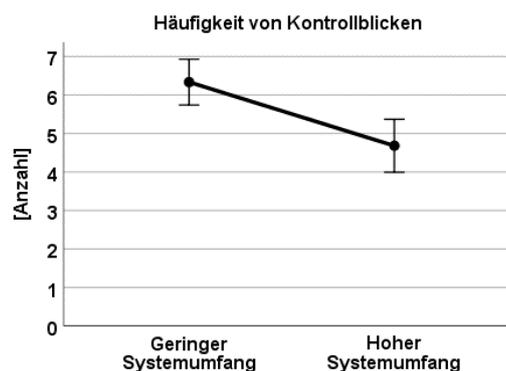


Abbildung 15: Anzahl der Kontrollblicke, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 12: ANOVA Anzahl der Kontrollblicke.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	1.79	3	24	.176	0.18
Situation * Systemumfang	1.01	3	24	.404	0.11
Situation * Ankündigung	1.37	3	24	.277	0.15
Situation * Systemumfang * Ankündigung	1.94	3	24	.151	0.20
Systemumfang	5.06	1	26	.033	0.16
Ankündigung	1.37	1	26	.252	0.05
Systemumfang * Ankündigung	0.21	1	26	.653	0.01

In Bezug auf die mittlere **Blicklänge** zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekt des Systemumfangs (siehe Tabelle 13). Bei geringem Systemumfang machen die Probanden längere Kontrollblicke (siehe Abbildung 16). Außerdem ergibt sich eine Interaktion aus Situation und Ankündigung (Abbildung 17). Post-hoc-Tests getrennt nach Situation zeigen nach Alpha-Adjustierung jedoch keine signifikanten Effekte (siehe Tabelle 14).

Tabelle 13: ANOVA Länge der Kontrollblicke.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	3.78	3	24	.024	0.32
Situation * Systemumfang	3.02	3	24	.050	0.27
Situation * Ankündigung	4.00	3	24	.019	0.33
Situation * Systemumfang * Ankündigung	1.34	3	24	.284	0.14
Systemumfang	7.63	1	26	.010	0.23
Ankündigung	0.06	1	26	.806	0.00
Systemumfang * Ankündigung	2.81	1	26	.106	0.10

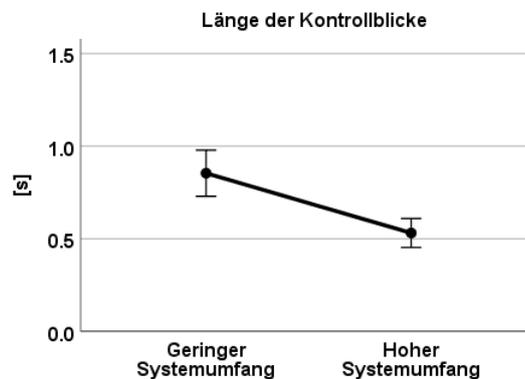


Abbildung 16: Länge der Kontrollblicke, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

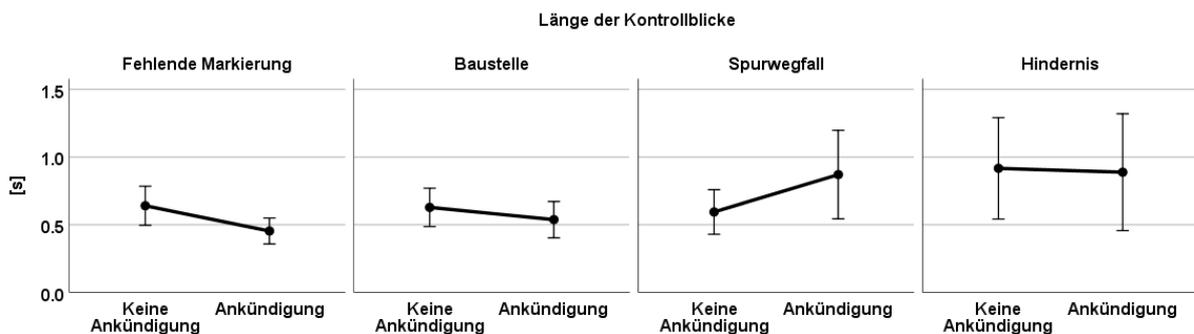


Abbildung 17: Länge der Kontrollblicke, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall (Interaktion Situation und Ankündigung).

Tabelle 14: T-Tests Länge der Kontrollblicke, Effekt der Ankündigung getrennt nach Situation. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0125.

Situation	Effekt	T	df	p
Fehlende Markierung	Ankündigung	2.31	28	.029
Baustelle	Ankündigung	1.00	30	.324
Spurwegfall	Ankündigung	-1.39	29	.174
Hindernis	Ankündigung	0.41	30	.688

3.1.3.2.7 Selbstbericht

Auf die selbsteingeschätzte **Situationskritikalität** in den Übernahme-situationen bei geringem Systemumfang findet sich nur ein signifikanter Einfluss der Situation, nicht aber der Ankündigung (siehe Tabelle 15). Die Situationen werden im Mittel als „unangenehm“ beurteilt (siehe Tabelle 16).

Tabelle 15: ANOVA Situationskritikalität.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Situation	4.13	3	12	.032	0.51
Situation * Ankündigung	0.37	3	12	.776	0.09
Ankündigung	0.10	1	14	.754	0.01

Tabelle 16: Situationskritikalität, deskriptive Statistiken.

Situation	M	SD
Fehlende Markierung	4.63	2.00
Baustelle	5.19	2.20
Spurwegfall	4.25	2.32
Hindernis	5.25	2.30

3.1.3.3 Studienteil B: Fehlerfall

3.1.3.3.1 Zeitpunkt der Handerkennung

Für die Berechnung müssen vier Probanden ausgeschlossen werden, da sie die Hände entweder bereits vor der Annäherung an die Fehlersituation am Lenkrad haben oder sie erst nach einer Kollision mit dem LKW ans Lenkrad nehmen.

Die Analyse ergibt einen signifikanten Haupteffekt des Systemumfangs und eine signifikante Interaktion aus Systemumfang und Ankündigung (siehe Abbildung 18 und Tabelle 17). Probanden in der Bedingung mit hohem Systemumfang reagieren später auf den Systemfehler. Die Auswirkung der ausbleibenden Ankündigung hängt vom Systemumfang ab. Post-hoc-Tests getrennt nach Systemumfang (siehe Tabelle 18) zeigen einen Unterschied der Ankündigungsbedingung nur bei geringem Systemumfang. Wenn die Fahrer des geringen Systemumfangs während der regulären Fahrt eine Ankündigung erhalten, reagieren sie in der Fehlersituation später.

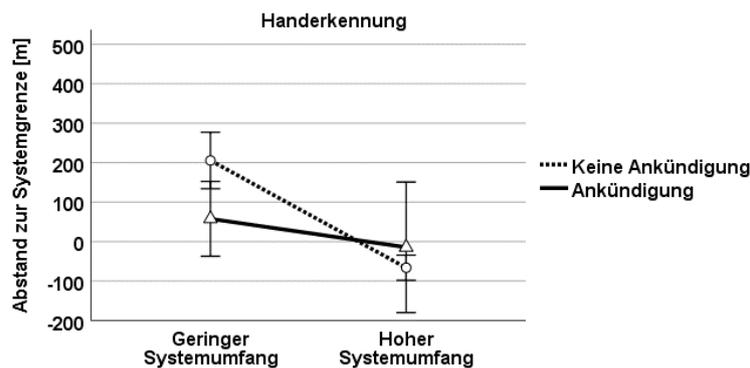


Abbildung 18: Zeitpunkt der Handerkennung in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 17: ANOVA Zeitpunkt der Handerkennung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	20.04	1	24	<.001	0.46
Ankündigung	1.56	1	24	.224	0.06
Systemumfang * Ankündigung	6.75	1	24	.016	0.22

Tabelle 18: T-Tests Zeitpunkt der Handerkennung in Fehlersituation, Effekt der Ankündigung getrennt nach Systemumfang. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Situation	Effekt	T	df	p
Geringer Systemumfang	Ankündigung	-3.05	13	.009
	Keine Ankündigung	0.85	11	.412
Hoher Systemumfang	Ankündigung	0.85	11	.412
	Keine Ankündigung	-3.05	13	.009

3.1.3.3.2 Deaktivierungszeitpunkt

Zwei Fahrer reagieren in keiner Weise auf die Situation. Für die restlichen Fahrer ist der Zeitpunkt der Erstreaktion, die zur Deaktivierung des Systems oder der Querführung führte, in Abbildung 19 dargestellt. Der Zeitpunkt unterscheidet sich nur im Systemumfang signifikant

(Haupteffekt Systemumfang siehe Tabelle 19). Die Probanden deaktivieren die Automation später, wenn sie bislang nicht selbst eingreifen mussten. Der Haupteffekt der Ankündigung sowie die Interaktion aus Ankündigung und Systemumfang sind nicht statistisch signifikant. Bei geringem Systemumfang zeigt sich auf deskriptiver Ebene eine Tendenz zu einer späteren Reaktion, wenn bislang eine Ankündigung präsentiert wurde (siehe Abbildung 19).

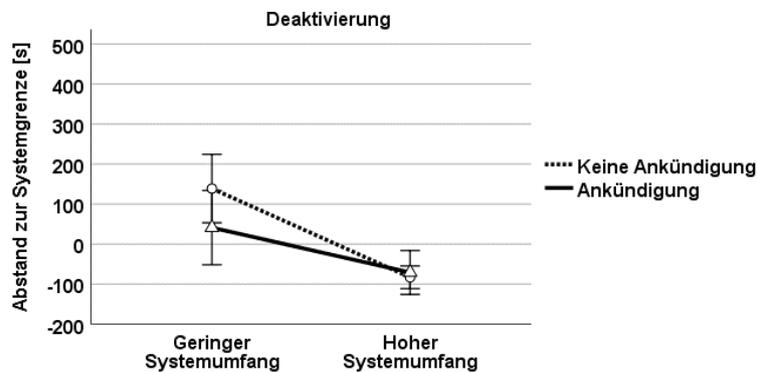


Abbildung 19: Deaktivierungszeitpunkt in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 19: ANOVA Deaktivierungszeitpunkt in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	33.24	1	26	<.001	0.56
Ankündigung	2.19	1	26	.151	0.08
Systemumfang * Ankündigung	3.59	1	26	.069	0.12

3.1.3.3.3 Manöverzeitpunkt

Abbildung 20 stellt den Manöverzeitpunkt beim Ausweichen vor dem Hindernis dar. Insgesamt weichen drei Probanden nicht aus und kollidieren mit dem Hindernis, so dass kein Manöverzeitpunkt berechnet werden kann.¹⁵ Wie beim Deaktivierungszeitpunkt zeigt sich ein Haupteffekt des Systemumfangs (siehe Tabelle 20). Bei hohem Systemumfang wechseln die Probanden signifikant später den Fahrstreifen. Die Interaktion aus Systemumfang und Ankündigung ist nicht statistisch signifikant. Bei geringem Systemumfang zeigt sich auf deskriptiver Ebene eine Tendenz zu einer späteren Manöverausführung, wenn bislang eine Ankündigung präsentiert wurde (siehe Abbildung 20).

¹⁵ Alle drei Fahrer gehören einer Ankündigungsbedingung an, zwei davon der Bedingung mit hohem Systemumfang.

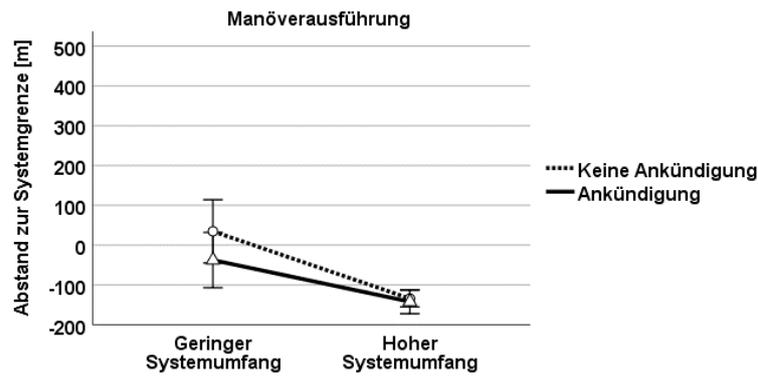


Abbildung 20: Manöverzeitpunkt in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 20: ANOVA Manöverzeitpunkt in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	15.25	1	25	.001	0.38
Ankündigung	3.62	1	25	.069	0.13
Systemumfang * Ankündigung	0.19	1	25	.670	0.01

3.1.3.3.4 Maximale Längsverzögerung

Zwei Probanden reagieren in keiner Weise auf die Situation, so dass kein Wert berechnet werden kann. Abbildung 21 zeigt, dass die Fahrer bei hohem Systemumfang stärker bremsen als bei geringem Systemumfang (Haupteffekt Systemumfang, siehe Tabelle 21). Die Ankündigung beeinflusst die maximale Längsverzögerung nicht signifikant (sowohl Haupteffekt als auch Interaktion sind nicht signifikant, siehe Tabelle 21).

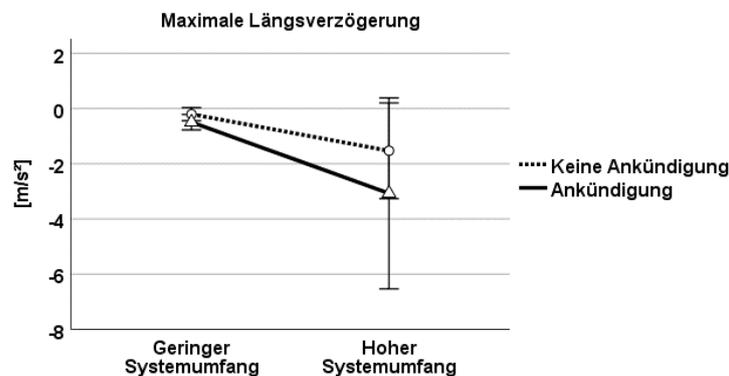


Abbildung 21: Maximale Längsverzögerung in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 21: ANOVA maximale Längsverzögerung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	6.42	1	26	.018	0.20
Ankündigung	1.41	1	26	.245	0.05
Systemumfang * Ankündigung	0.66	1	26	.424	0.03

3.1.3.3.5 Maximale Querschleunigung

Zwei Probanden reagieren in keiner Weise auf die Situation, so dass kein Wert berechnet werden kann. Bei hohem Systemumfang treten höhere Querschleunigungen auf als bei geringem Systemumfang (Haupteffekt Systemumfang), während die Ankündigung keinen signifikanten Einfluss hat (sowohl Haupteffekt als auch Interaktion sind nicht signifikant; siehe Abbildung 22 und Tabelle 22).

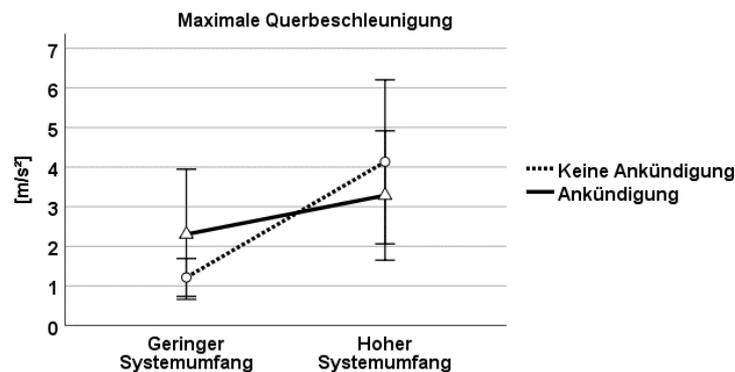


Abbildung 22: Maximale Querschleunigung in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 22: ANOVA maximale Querschleunigung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	8.89	1	26	.006	0.26
Ankündigung	0.03	1	26	.856	0.00
Systemumfang * Ankündigung	2.20	1	26	.150	0.08

3.1.3.3.6 Minimale TTC

Bei der minimalen Time-to-collision zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt des Systemumfangs sowie der Ankündigung (siehe Tabelle 23). Bei hohem Systemumfang und in der Bedingung mit Ankündigung ergeben sich signifikant kritischere Abstände zum stehenden Hindernis (siehe Abbildung 23). Die Interaktion aus Systemumfang und Ankündigung ist nicht signifikant. Auf deskriptiver Ebene scheint der Effekt der Ankündigung bei geringem Systemumfang stärker ausgeprägt zu sein (siehe Abbildung 23).

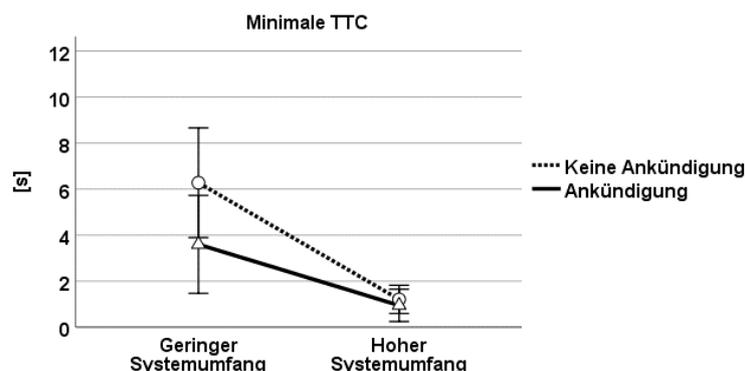


Abbildung 23: Minimale TTC in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 23: ANOVA minimale TTC in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Systemumfang	30.06	1	28	<.001	0.52
Ankündigung	4.35	1	28	.046	0.13
Systemumfang * Ankündigung	2.95	1	28	.097	0.10

3.1.3.3.7 Blickverhalten

Aufgrund ungenügender Qualität der Blickdaten müssen zwei Fahrer von der Analyse ausgeschlossen werden. Es zeigt sich kein signifikanter Einfluss der experimentellen Faktoren auf die Anzahl der Kontrollblicke (siehe Tabelle 24), jedoch werden bei hohem Systemumfang kürzere Kontrollblicke ausgeführt (Tabelle 25 und Abbildung 24).

Tabelle 24: ANOVA Anzahl der Kontrollblicke in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Systemumfang	0.25	1	26	.623	0.01
Ankündigung	2.41	1	26	.133	0.09
Systemumfang * Ankündigung	0.76	1	26	.390	0.03

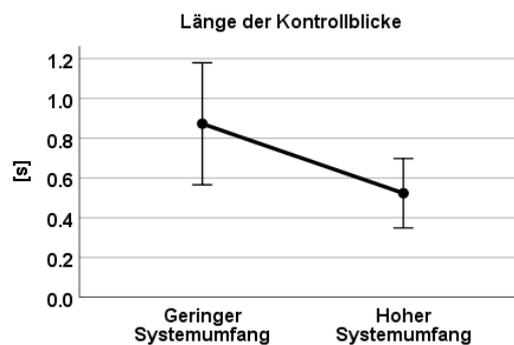


Abbildung 24: Länge der Kontrollblicke in Fehlersituation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 25: ANOVA Länge der Kontrollblicke in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Systemumfang	4.39	1	26	.046	0.14
Ankündigung	0.28	1	26	.604	0.01
Systemumfang * Ankündigung	0.18	1	26	.673	0.01

3.1.3.3.8 Selbstbericht

Auf Ebene der selbstberichteten **Situationskritikalität** findet sich lediglich ein Haupteffekt des Systemumfangs (siehe Abbildung 25 bzw. Tabelle 26). Die Fahrer der Bedingung mit hohem Systemumfang schätzen die Situation kritischer ein ($M = 7.69$, „gefährlich“ $SD = 1.62$) als Fahrer des geringen Systemumfangs ($M = 5.75$, „unangenehm“ $SD = 2.86$). Der Haupteffekt der Ankündigung und die Interaktion aus Ankündigung und Systemumfang sind nicht signifikant.

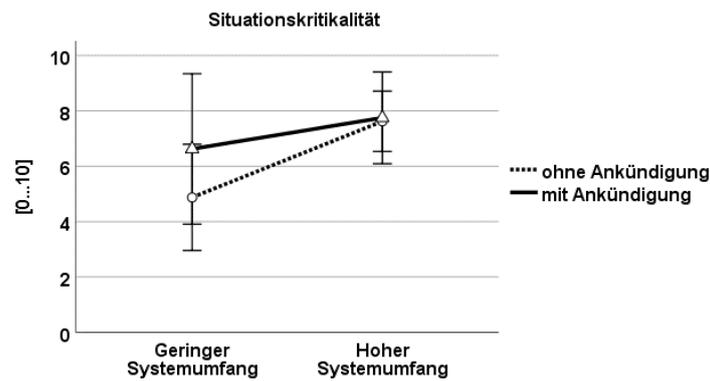


Abbildung 25: Situationalkritikalität in Fehlersituation („Wie bewerten Sie die Situation?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 26: ANOVA Situationalkritikalität in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Systemumfang	5.60	1	28	.025	0.17
Ankündigung	1.31	1	28	.262	0.05
Systemumfang * Ankündigung	0.99	1	28	.329	0.03

3.1.4 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach Studienteil A (= reguläre Fahrt mit korrektem Systemverhalten, Ausgabe von Übernahmeaufforderungen bei geringem Systemumfang, Ausführung eines Fahrmanövers bei hohem Systemumfang) und Studienteil B (= Systemfehler, Ausbleiben der Systemausgaben und -reaktion bei nicht-erkanntem Hindernis) zusammengefasst und diskutiert.

3.1.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)

Der Fokus der ersten Studie lag darauf, die Auswirkungen von Situationsankündigungen, die den Fahrer frühzeitig über bevorstehende Systemgrenzen informieren, auf den Aufgabenwechsel von der Ausführung einer fahrfremden Tätigkeit während einer automatisierten Fahrt zum manuellen Fahren zu untersuchen. Vor dem Hintergrund der Grundlagenforschung im Bereich der kognitiven Psychologie (Kiesel et al., 2010) wurde erwartet, dass die Möglichkeit zur Vorbereitung und selbstständigen Initiierung von Aufgabenwechseln zu erwartende Wechselkosten, die im Bereich des automatisierten Fahrens bei kurzfristigen Übernahme-situationen beobachtet wurden (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013), mindern würde (Janssen et al., 2019; van der Heiden et al., 2017). Im Rahmen dieser Studie erlebten die Fahrer deshalb während einer automatisierten Fahrt im Fahrsimulator verschiedene Übernahme-situationen („Fehlende Spurmarkierungen“, „Baustelle“, „Spurwegfall“ und „Hindernis“), die frühzeitig angekündigt wurden oder nicht.

Zusammenfassend lässt sich im Hinblick auf die Wirksamkeit von frühzeitigen Ankündigungen feststellen, dass diese sich in bevorstehenden Übernahmesituationen im Vergleich zu späteren dringlichen Übernahmeaufforderungen positiv auf die Übernahmeleistung auswirkten. In Bezug auf zeitliche Aspekte fanden sich Hinweise auf frühzeitigere Wechsel von der fahrfremden Tätigkeit zur Ausführung der manuellen Kontrolle, wobei sich diese vor allem in komplexen Fahrsituationen, in denen neben der reinen Stabilisierung des Fahrzeugs auch ein Wechsel des Fahrstreifens notwendig war, zeigten. In der Bedingung mit Ankündigung nahmen die Fahrer in den Situationen „Hindernis“ und „Baustelle“ die Hände frühzeitiger ans Lenkrad als Fahrer in der Bedingung ohne Ankündigung. Außerdem wurden Manöver mit Ankündigung in beiden Spurwechselszenarien („Hindernis“ und „Spurwegfall“) früher ausgeführt. Hinsichtlich der Übernahmequalität zeigte sich ein statistisch signifikanter Einfluss der frühzeitigen Ankündigung durch eine geringere minimale TTC in der Situation „Hindernis“. Statistisch signifikante Effekte auf die Quer- und Längsdynamik des Fahrzeugs, die insbesondere für eine bessere Stabilisierung des Fahrzeugs nach der Kontrollübernahme durch frühzeitige Ankündigungen sprechen würden, zeigten sich nicht. Ein Einfluss auf die Qualität des Aufgabenwechsels durch die Möglichkeit diesen vorzubereiten, bestand folglich vor allem in Bezug auf die Kollisionsvermeidung, jedoch nicht in Bezug auf die reine Fahrzeugstabilisierung.

Im Rahmen der Studie wurde neben der Ankündigungsbedingung auch der Automationsumfang variiert. Zusätzlich zur Bedingung, in der die Fahrer die Kontrolle übernehmen mussten (geringer Systemumfang), gab es eine Bedingung, in der die Automation die Situationen selbstständig, beispielsweise durch einen automatisierten Fahrstreifenwechsel, löste (hoher Systemumfang). Vor dem Hintergrund der Automationsforschung wurde vermutet, dass eine Steigerung der Unterstützung durch die Automation (im vorliegenden Fall durch die automatische Manöverausführung oder die Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung von Systemgrenzen; Brown & Noy, 2004, Lee & See, 2004) mit einer Steigerung des Vertrauens in die Automation und infolgedessen mit einer Verringerung der Überwachung der Fahraufgabe einhergeht (de Winter et al., 2014). Entgegen dieser Erwartung hatten weder der Systemumfang noch die Ankündigungsbedingung einen signifikanten Einfluss auf die Blickverteilung in freien Fahrtabschnitten (automatisierte Fahrt ohne das Auftreten potentieller Systemgrenzen). In Annäherung an Systemgrenzen war das Blickverhalten jedoch vom Systemumfang abhängig. Bei geringem Systemumfang wurde ein höherer Anteil sowie eine höhere Anzahl an Blicken auf die Fahrbahn oder die Spiegel beobachtet, die sich zudem durch eine längere mittlere Blickdauer auszeichneten. Ob Situationsankündigungen ausgegeben wurden oder nicht, hatte entgegen der ursprünglichen Erwartung jedoch keinen signifikanten Effekt auf das Blickverhalten in Annäherung an Systemgrenzen.

3.1.4.2 Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt)

Die Ergebnisse in Bezug auf die Übernahmeleistung bestätigen die Befunde anderer Studien, die ebenfalls positive Effekte frühzeitiger Vorinformationen zeigen konnten. Lapoehn et al. (2016) berichteten, dass Fahrer durch Vorinformationen über Systemgrenzen verglichen mit späten Übernahmeaufforderungen die Hände früher ans Lenkrad nahmen und die Fahrzeugkontrolle frühzeitiger übernahmen. Van der Heiden et al. (2017) konnten zeigen, dass Fahrer durch *pre-alerts* in Annäherung an eine Systemgrenze bei Ausführung einer fahrfremden Tätigkeit zügiger ihre Geschwindigkeit reduzierten als ohne *pre-alert*. Holländer und Pfleging (2018) fanden keine Vorteile von zwei Vorwarnbedingungen (Balken vs. Countdown) gegenüber keiner Vorwarnung hinsichtlich zeitlicher Reaktion, wohl aber in Bezug auf die Häufigkeit von „idealem“ Fahrverhalten. Außerdem wurden die Vorwarnungen bezüglich ihrer Gebrauchstauglichkeit besser eingeschätzt.

Eine Erweiterung des wissenschaftlichen Kenntnisstands durch die vorliegenden Ergebnisse besteht darin, dass sich positive Auswirkungen der frühzeitigen Ankündigungen (frühere Initiierung des Manövers und geringere Situationskritikalität) auf Situationen beschränkten, in denen ein komplexes Fahrmanöver zur Lösung der Situation erforderlich war. In den Situationen „Baustelle“ und „fehlende Spurmarkierung“, in denen kein Spurwechsel nötig war, wurden hingegen keine konsistenten, positiven Auswirkungen der Situationsankündigungen auf die Übernahmeleistung gefunden. Ein Grund hierfür kann darin liegen, dass Fahrer insbesondere bei komplexen Fahrsituationen vor der Übernahme Situationsbewusstsein aufbauen und die notwendigen Handlungsschritte innerhalb des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets planen und ausführen müssen (Lu et al., 2017; Vlakveld et al., 2018; Vogelpohl et al., 2019). Beim Wechsel auf komplexere, stärker beanspruchende Fahraufgaben besteht folglich ein höherer Unterstützungsbedarf. Diese Annahme kann dadurch gestützt werden, dass Situationen mit Notwendigkeit zum Fahrstreifenwechsel als kritischer erlebt werden als Situationen ohne dieses Erfordernis. Das Ergebnis steht im Einklang mit den Überlegungen von Gold und Naujoks et al. (2017), nach denen Übernahmesituationen, die keine komplexen Fahrerreaktionen erfordern, nicht sensitiv für die Untersuchung der Übernahmeleistung sind. Dass in Situationen ohne erforderlichen Spurwechsel keine konsistenten Effekte der Ankündigung gefunden wurden, kann auch in Zusammenhang mit der Umsetzung des konkreten Systemverhaltens stehen. Da sich das System nach Ablauf von 3.5 Sekunden nach der Ausgabe der Übernahmeaufforderung selbstständig deaktiviert, mussten die Probanden das System nicht aktiv deaktivieren, sondern konnten abwarten, bis sich das System selbstständig abschaltete.

Ein Unterschied zu bereits vorhandenen Forschungsergebnissen besteht darin, dass in der Annäherung an die Systemgrenze keine positiven Effekte der Ankündigung auf das

Überwachungsverhalten gefunden wurden, wie beispielsweise in der Studie von van der Heiden et al. (2017) und Lu et al. (2019). Eine Erklärung hierfür liegt möglicherweise darin, dass die fahrfremde Tätigkeit von den Probanden nicht aktiv pausiert werden konnte, sondern während der Annäherung bzw. nach der Deaktivierung des automatisierten Fahrens aktiv blieb und weiterbearbeitet werden konnte. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Probanden weiterhin Blicke auf die Aufgabe tätigten.

In Bezug auf den Systemumfang wurde in Annäherung an potentielle Systemgrenzen eine geringere Blickzuwendung zur Fahrsituation bei Fahrern des hohen Systemumfangs gefunden. Die Probanden überwachten die Fahrsituation weniger stark, wenn sie die Kontrolle nicht übernehmen mussten (d. h. geringerer Blickanteil, weniger und kürzere Blicke auf die Fahrsituation). Eine Abnahme des Überwachungsverhaltens bei steigendem Automationsgrad wurde im Kontext der Automationsforschung bereits berichtet (de Winter, J. et al., 2014; Naujoks et al., 2016). Vor allem hoch zuverlässige automatisierte Systeme begünstigen ein reduziertes Überwachungsverhalten von Nutzern (Parasuraman & Manzey, 2010; Walker, Verwey, & Martens, 2018). Die Abnahme des Überwachungsverhaltens kann als Beleg für die Annahme gewertet werden, dass die Steigerung des Systemumfangs zu einem höheren Automationsvertrauen führt. Ein Zusammenhang zwischen Automationsvertrauen und dem Überwachungsverhalten wurde beispielsweise von Muir und Moray (1996) gefunden. Auch im Bereich des automatisierten Fahrens wurden empirische Beispiele berichtet, die einen Zusammenhang zwischen Automationsvertrauen und Blickverhalten stützen. Hergeth et al. (2016) sowie Körber, Baseler und Bengler (2018) fanden beispielsweise einen Zusammenhang zwischen subjektivem, selbstberichteten Automationsvertrauen und Blickverhalten. Walker et al. (2018) ließen Probanden Videos sehen, in denen eine Fahrzeugautomation die Fahrzeugführung mehr oder weniger gut beherrschte. Die Autoren fanden ebenfalls, dass die Probanden die Verkehrssituation weniger stark überwachten und sich stärker einer Nebenaufgabe zuwandten, wenn die Automation die Fahrzeugführung besser beherrschte und sie der besseren Automation stärker vertrauten. Die vorliegende Studie bestätigt somit die zitierten Forschungsarbeiten und erweitert sie um den Faktor des Systemumfangs als vertrauensfördernden Faktor im Kontext des automatisierten Fahrens. Es ist nicht auszuschließen, dass das geringere Überwachungsverhalten bei geringem Systemumfang durch die unterschiedlichen Instruktionen begünstigt wurde. Da sich die beiden Systemumfänge jedoch in den freien Fahrten nicht signifikant unterschieden (siehe nächster Abschnitt), scheint ein möglicher Einfluss der Instruktion unwahrscheinlich.

Ungewiss ist an dieser Stelle jedoch, warum sich während der freien Fahrten kein signifikanter Effekt des Systemumfangs auf das Überwachungsverhalten zeigte. Eine Erklärung hierfür könnte darin liegen, dass die Probanden in der Bedingung mit geringem Systemumfang ihr Verhalten an die Verkehrssituation anpassten, indem sie mehr Überwachung bei hohem situativem

Handlungserfordernis (in Annäherung an Übernahmesituation), aber weniger Überwachung bei geringem situativem Erfordernis (in freien Fahrten) zeigten. Frühere Studien, die auch eine situationsadaptive Aufmerksamkeitsverteilung bei Nutzung von Fahrzeugautomation gezeigt haben, legen einen solchen Schluss nahe (Jamson et al., 2013; Naujoks et al., 2016).

3.1.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)

Im zweiten Studienteil wurde die Reaktion auf einen simulierten Systemfehler untersucht. Am Ende der Fahrt kam es in beiden Systemumfangsbedingungen zu einem stillen Systemausfall der Automation. Dabei wurde ein stehendes Hindernis nicht erkannt, so dass keine Regelung auf das Objekt stattfand und die Fahrer nicht über die Übernahmenotwendigkeit informiert wurden. Die Situation kam für die Probanden unerwartet, weil sie über diese Art des Automationsversagens nicht im Vorfeld informiert wurden und das System bis zu diesem Zeitpunkt (d. h. während der gesamten Eingewöhnungs- und Messfahrt) korrekt arbeitete.

Aus theoretischer Perspektive handelte es sich bei dieser Situation um einen Aufgabenwechsel zum manuellen Fahren, den die Probanden ohne einen Hinweis (d. h. Darbietung einer Ankündigung oder Übernahmeaufforderung) aufgrund der situativen Umstände selbst erkennen und durchführen mussten. Beim hochautomatisierten Fahren (SAE Level 3) ist der Fall, dass der menschliche Benutzer das Übernahmeerfordernis erkennen muss, nicht vorgesehen (SAE International, 2018). Allerdings bietet die Simulation eines solchen Automationsfehlers die Möglichkeit, die Auswirkungen des durch die Systemausprägungen (Systemumfang und Ankündigung) erlangten Automationsvertrauens zu untersuchen.

Bei Fahrern, die an den Erhalt frühzeitiger Ankündigungen gewöhnt waren oder die Fahraufgabe bislang nicht regelmäßig übernehmen mussten, wurde ein geringeres Überwachungsverhalten und eine stärkere Beachtung der fahrfremden Tätigkeit aufgrund eines höheren Automationsvertrauens erwartet. Dies kann zu einer Minderung der Reaktionsfähigkeit auf unangekündigte Automationsfehler führen (Naujoks, Höfling, Purucker, & Zeeb, 2018). Erwartet wurde deswegen, dass beide experimentelle Faktoren zu verlängerten Übernahmezeiten und kritischeren Situationen im Sinne einer verringerten Übernahmequalität führen würden.

Bezüglich des **Systemumfangs** lässt sich festhalten, dass Fahrer des hohen Systemumfangs, deren System in der regulären Fahrt alle Manöver selbstständig ausführte, in Annäherung an die Fehlersituation erwartungsgemäß ein geringeres Überwachungsverhalten zeigten. Sie griffen außerdem später in die Fahrzeugkontrolle ein, um eine Kollision mit dem Hindernis zu vermeiden. Dies zeigte sich sowohl auf Ebene der ersten messbaren Reaktion (Handkontakt mit dem Lenkrad) sowie der Systemdeaktivierung und der Manöverausführung. Bezüglich der Übernahmequalität zeigte sich eine Verschlechterung des Aufgabenwechsels bei hohem

Systemumfang gegenüber dem geringen Systemumfang in allen untersuchten Qualitätsaspekten (d. h. stärkere Reaktion in Quer- und Längsdynamik, geringerer minimaler Zeitabstand zum Hindernis und kritischere Situationsbewertung).

Die Effekte der **Ankündigung** waren im Falle eines Systemversagens weniger deutlich, wiesen jedoch ebenfalls auf eine Verschlechterung der Fahrerreaktion im Vergleich zu der Experimentalgruppe, die in der regulären Fahrt keine Ankündigung erhielt, hin. Wenn die Fahrer während der regulären Fahrt immer eine Ankündigung erhielten, nahmen sie in der Bedingung mit geringem Systemumfang die Hände signifikant später ans Lenkrad, als wenn sie nie eine Ankündigung erhielten. Auf deskriptiver Ebene zeigten sich in dieser Bedingung ebenfalls Hinweise auf eine spätere Deaktivierung. Auf die maximale Quer- und Längsdynamik, die selbstberichtete Kritikalität oder das Blickverhalten hatte die Ankündigungsbedingung keinen signifikanten Einfluss. Jedoch waren die minimalen Abstände (TTC) zum Hindernis signifikant geringer und damit kritischer als in der Bedingung, die nie eine Ankündigung erhielt.

3.1.4.4 Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall)

Zusammengefasst bestätigen die Ergebnisse aus diesem Studienteil allgemeine Erkenntnisse aus der Automationsforschung (z. B. der Luftfahrt oder der automatisierten Produktion, etc.), die zeigen, dass menschliche Nutzer von hoch zuverlässigen automatisierten Systemen eine verringerte Fähigkeit zeigen, Automationsfehler zu korrigieren bzw. im Fall von Automationsfehlern rechtzeitig und adäquat einzugreifen (Bainbridge, 1983; Parasuraman et al., 2000; Onnasch et al., 2014; Parasuraman & Manzey, 2010). Auch im Bereich der Fahrzeugautomation konnten Studien diese Ergebnisse schon früh bestätigen. De Waard, van der Hulst, Hoedemaeker und Brookhuis (1999) verwendeten eine zu dieser Studie ähnliche Versuchsanordnung, in der die Fahrer am Ende einer automatisierten Fahrt ohne eine vorherige Übernahmeaufforderung in die Fahrzeugführung eingreifen mussten, um eine Kollision zu vermeiden. Dabei zeigte sich, dass nur etwa die Hälfte der Fahrer überhaupt mit einem Eingriff reagierte.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass der hohe Systemumfang, bei dem die vorherigen Situationen stets durch die Automation gelöst wurden, zu einem stärkeren Automationsvertrauen geführt hat. Für die negativen Auswirkungen des hohen **Systemumfangs** in der vorliegenden Studie kommen verschiedene Erklärungsansätze in Frage: Bei hohem Systemumfang bemerkten Probanden die Situation nicht oder zu spät, weil sie die Verkehrssituation weniger stark überwachten als Fahrer des geringen Systemumfangs, was sich in kürzeren Kontrollblicken kurz vor der Situation zeigte. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit Veröffentlichungen zum teilautomatisierten Fahren (Louw et al., 2019; Naujoks et al., 2016). Louw et al. (2019) zeigten

beispielsweise, dass Probanden bei visueller Ablenkung länger brauchten, um auf stille (unangekündigte) Ausfälle einer Fahrzeugautomation zu reagieren. Auch Strand, Nilsson, Karlsson und Nilsson (2014) erklärten die verringerte Übernahmeleistung bei einem höheren Automationslevel mit einem verringerten Situationsbewusstsein, das durch die Zunahme der Fahrzeugautomation begünstigt wird. Dieser Erklärung steht entgegen, dass sich die Kontrollblicke zwischen den Systemumfängen in den freien Fahrten (siehe Studienteil A) nicht unterscheiden.

Alternativ ist es deswegen möglich, dass Probanden die Situation zwar frühzeitig bemerkten, aber bei hohem Systemumfang nicht reagierten (mit verstärkter Blickzuwendung und einer Vorbereitung der Fahrzeugübernahme), weil sie sich auf das Eingreifen der Automation verließen. Victor et al. (2018) zeigten beispielsweise in einer Reihe von Teststrecken-Studien, dass die visuell-manuelle Vorbereitung alleine (d. h. Hände ans Lenkrad nehmen und auf die Straße blicken) die Bewältigung von Systemgrenzen beim teilautomatisierten Fahren nicht präzisieren kann. Entscheidend darüber, ob Fahrer Systemausfälle teilautomatisierter Fahrzeuge kompensieren, ist vielmehr die korrekte Annahme darüber, dass die Automation die Situation nicht bewältigen wird.

Als Erklärung für die negative Auswirkung der ausbleibenden **Ankündigung** kommt das Überwachungsverhalten nicht in Frage: Es konnte kein signifikanter Effekt der Ankündigungsbedingung auf das Überwachungsverhalten in Annäherung an die Situation gefunden werden. Die Effekte der Ankündigung auf die Übernahmezeit (bezogen auf die spätere Handerkennung am Lenkrad) bei geringem Systemumfang und die Übernahmequalität (bezogen auf den geringeren Abstand zum Hindernis) bei beiden Systemumfängen sind womöglich ebenfalls auf ein zu starkes Verlassen auf die Ankündigung als Hinweis auf ein relevantes Ereignis zurückzuführen (Larsson, Kircher, & Andersson Hultgren, 2014; Victor et al., 2018). Die Ausgabe von Ankündigungen erhöhte das Automationsvertrauen, was sich jedoch vor allem in einer kognitiven Komponente (d. h. einer späteren Entscheidung zu einem manuellen Eingriff; siehe Victor et al., 2018) und weniger im Blickverhalten der Probanden niederschlug.

Die negativen Effekte der Ankündigung im Falle eines Systemfehlers sollten jedoch vor dem Hintergrund gesehen werden, dass es beim hochautomatisierten Fahren (SAE Level 3) zu keinen vollständigen Sensorausfällen, die nicht durch das System detektiert werden, und somit nicht mindestens eine kurzfristige Übernahmeaufforderung zur Folge haben, kommen sollte. Die Ergebnisse machen deutlich, dass Nutzer in solchen Fällen und unter Bedingungen, die denen dieses Versuchs ähneln (z. B. was die Häufigkeit von Systemfehlern und die Erfahrungsdauer mit automatisiertem Fahren anbelangt) vermutlich trotz dieses Wechsels der Verantwortlichkeit versuchen werden, auf Fehlersituationen zu reagieren.

3.1.4.5 Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Studie konnte den prinzipiellen Nutzen von frühzeitigen Situationsankündigungen beim automatisierten Fahren darlegen und die situativen Umstände, unter denen Fahrer von Vorinformationen profitieren, identifizieren. Im Folgenden werden einige Limitationen der Studie berichtet, die Einfluss auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse haben können. Außerdem wird weiterer Forschungsbedarf im Zusammenhang mit frühzeitigen Situationsankündigungen aufgezeigt.

Zunächst ist die geringe Stichprobe als einschränkender Faktor zu nennen und bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Mängel bei der Blickdatenqualität sowie die fehlende explizite Instruktion, während der automatisierten Fahrt die Hände vom Lenkrad zu nehmen, um den Zeitpunkt der Handerkennung bestimmen zu können, haben die Stichprobe in diesen Variablen zusätzlich verringert. Die Zellbesetzung von acht Probanden ist dabei am unteren Ende der noch als sinnvoll zu erachtenden Stichprobengröße für die Messung von Gruppenunterschieden (VanVoorhis & Morgan, 2007). Die Ergebnisse sollten deshalb anhand einer größeren Stichprobe repliziert und validiert werden.

Bei der verwendeten fahrfremden Tätigkeit handelte es sich um eine standardisierte, künstliche Aufgabe, die eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Alltagssituationen erschwert. Um das natürliche Verhalten im Umgang mit einer Aufgabe während einer bevorstehenden Übernahmesituation abbilden zu können und die externe Validität der Untersuchung zu steigern, wäre eine realistischere fahrfremde Tätigkeit wünschenswert gewesen. Eine weitere Limitation der verwendeten Aufgabe besteht darin, dass aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur aktiven Pausierung der Aufgabe Maße wie der Unterbrechungs- und Wiederaufnahmezeitpunkt nicht betrachtet werden können. Aus diesem Grund wird in den Folgestudien die Verwendung einer unterbrechbaren Aufgabe mit einer höheren Realitätsnähe angestrebt, die zudem Rückschlüsse auf die kontinuierliche Aufgabenleistung zulässt.

In Bezug auf die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Effekte der Ankündigung von deren Präsentationszeitpunkt abhängen können. In dieser Studie wurden die Fahrer 500 Meter (ca. 15 Sekunden bei 120 km/h) vor der Übernahmeaufforderung durch eine Situationsankündigung informiert. Möglicherweise wird ein größeres als das bisher untersuchte Zeitfenster benötigt, um deutlichere Effekte auf die Vorbereitung und Durchführung des Wechsels von der fahrfremden Tätigkeit zur manuellen Fahrt zeigen zu können. Es sollte deshalb in zukünftigen Studien untersucht werden, welche Zeitpunkte für eine optimale Vorbereitung am besten geeignet sind. Studie 2 wird sich mit dieser Fragestellung befassen.

Die untersuchten Situationsankündigungen enthielten stets die Angabe des Übernahmegrundes. Derartige Informationen sind unter Umständen jedoch nicht immer verfügbar. In der zweiten Studie sollte deshalb untersucht werden, welche Informationen für eine optimale Vorbereitung der Übernahme der Fahrzeugkontrolle benötigt werden, oder ob auch unspezifische Vorinformationen ausreichen, um den Fahrer auf die Übernahme der Fahrzeugführung vorzubereiten. Außerdem ist auf Basis der vorliegenden Ergebnisse bislang nicht eindeutig trennbar, welchen Einfluss die Darbietung derartiger Informationen über die bevorstehende Systemgrenze und welchen Einfluss die Frühzeitigkeit auf die Wirksamkeit von Situationsankündigungen verglichen mit späten Übernahmeaufforderungen hat. In der zweiten Studie wurden deshalb die Spezifität und der Zeitpunkt der Informationsdarbietung unabhängig voneinander variiert.

Weiterhin wurden die Ankündigungen in dieser Studie – mit Ausnahme der Fehlerfälle – immer zuverlässig ausgegeben. Auch wenn frühzeitig angekündigte Übernahmesituationen im realen Einsatz des automatisierten Fahrens wahrscheinlich häufig auftreten werden (z. B. an Autobahnabfahrten oder Dauerbaustellen), wird es vermutlich weiterhin Situationen geben, die nicht frühzeitig angekündigt werden können. Interessant ist deswegen die Frage nach der Fahrerreaktion in Situationen, in denen die Ankündigung ausbleibt, und nur eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben wird. Auch diese Fragestellung wird in Studie 2 aufgegriffen.

In diesem Zusammenhang wäre es außerdem interessant gewesen, zu untersuchen, wie Fahrer reagieren, wenn sie im Anschluss an das Erleben des Systemfehlers (wie am Ende dieser Studie) wieder mit regulären Übernahmesituationen (inklusive Ankündigungen und Übernahmeaufforderungen) konfrontiert werden (de Visser, Pak, & Shaw, 2018). Insbesondere stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, wie das Vertrauen in die Automation nach derartigen Automationsfehlern wiederhergestellt werden kann. Die Fragestellung stellt einen Anknüpfungspunkt für zukünftige Studien dar.

3.2 Studie 2: Zeitpunkt und Informationsgehalt der Situationsankündigung

3.2.1 Fragestellung

Ausgehend von den Ergebnissen der ersten Studie, die das Potential von Situationsankündigungen, frühzeitigere Übernahmen im Kontext des automatisierten Fahrens zu begünstigen, aufzeigen konnte, beschäftigt sich die zweite Studie mit spezifischen Gestaltungsaspekten der Ankündigung. Im Mittelpunkt der Studie stand, wie eine Ankündigung von Systemgrenzen eines hochautomatisierten Fahrzeugs ausgestaltet sein sollte, um den Fahrer bestmöglich bei der Rückführung in die manuelle Fahrzeugkontrolle zu unterstützen. Dazu wurde untersucht, wie sich Variationen der Gestaltungsmerkmale „Zeitpunkt“ und „Spezifität“ der Ankündigung auf den Prozess der selbst-initiierten Ablösung von einer fahrfremden Tätigkeit, bei der vorgegebene Sätze auf einem Tablet abgetippt werden mussten, und die Übernahme der Fahrzeugkontrolle auswirken.

Ein idealer Ankündigungszeitpunkt sollte dem Fahrer ausreichend Zeit zur Vorbereitung des Aufgabenwechsels bieten. Bei einer zu späten Präsentation hat eine Vorankündigung möglicherweise nicht den erwarteten Nutzen, wenn die Zeit nicht dafür ausreicht, um eine Aufgabe zu einem sinnvollen Zeitpunkt zu unterbrechen oder Situationsbewusstsein vollständig aufzubauen. Bei einer zu frühen Präsentation sind ebenfalls negative Auswirkungen vorstellbar (van der Heiden et al., 2017; Wintersberger, Green et al., 2017). Wenn die Fahrer das System direkt im Anschluss an eine sehr frühzeitige Ankündigung deaktivieren, wird die Zeit im automatisierten Fahrmodus nicht optimal genutzt (Richardson et al., 2018). Wenn die Fahrer mit der Deaktivierung hingegen warten, bis sie näher an der Systemgrenze sind, kann über einen längeren Zeitraum eine Doppelbeanspruchung durch Kontrollblicke zur Überwachung der Verkehrssituation und der Restdistanz im automatisierten Modus entstehen.

Um die Frage zu beantworten, wann die Ankündigung der Übernahme erfolgen soll, wurde der Zeitpunkt der Ankündigung im ersten Studienteil experimentell variiert und untersucht, unter welchen Bedingungen eine Unterbrechung bzw. Weiterbearbeitung der fahrfremden Tätigkeit stattfindet. Dazu wurden drei Zeitpunkte untersucht (15, 30 und 60 Sekunden bis zur Systemgrenze), die bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h einem Abstand von 500, 1000 bzw. 2000 Meter zur Systemgrenze entsprechen. Die Präsentationszeitpunkte sollten deutlich früher als bei „klassischen“, dringlichen Übernahmeaufforderungen erfolgen, die laut Eriksson und Stanton (2017b) bei einem mittleren Zeitbudget von ca. sechs Sekunden liegen (entspricht ca. 200 Meter

bei 120 km/h). Die Auswahl der verglichenen Zeitpunkte greift den in der Vorgängerstudie verwendeten Zeitpunkt wieder auf und orientiert sich darüber hinaus an bereits publizierten Studien (siehe bspw. Pampel et al., 2019; van der Heiden et al., 2017).

Neben der Unterbrechung der Aufgabe in Annäherung an die Systemgrenze ist ebenfalls der Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Tätigkeit nach der manuellen Fahrtepisode von Interesse. Auch Wiederaufnahmekosten können davon beeinflusst sein, ob vor der Unterbrechung genügend Zeit zur Verfügung stand, diese vorzubereiten (Trafton et al., 2003). Aus theoretischer Sicht ist anzunehmen, dass die Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit durch die manuelle Kontrollübernahme dann zu Kosten bei der späteren Weiterbearbeitung führt, wenn Fahrer im Vorfeld der Unterbrechung nicht genügend Zeit für das Memorieren relevanter Aufgabeninhalte (z. B. an welcher Stelle sie zuletzt in der Aufgabe waren) haben.

Bezüglich der inhaltlichen Ausgestaltung der Situationsankündigungen sollte in dieser Studie deren Spezifität untersucht werden. Prinzipiell können auch unspezifische Ankündigungen (bspw. auditive Hinweistöne; siehe van der Heiden et al., 2017) die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung aus dem automatisierten Fahren erleichtern. Aus der Grundlagenforschung existieren jedoch Hinweise, dass spezifische Informationen über die bevorstehende Aufgabe Wechselkosten wesentlich wirksamer senken können (Arbuthnott & Woodward, 2002; Nicholson et al., 2006). Eine spezifische Ankündigung könnte den Fahrer im Vorfeld einer Übernahme beim Aufbau von Situationsbewusstsein unterstützen. Um zu untersuchen, ob Fahrer von einer Ankündigung mit spezifischen Informationen profitieren, waren in dieser Studie der Ort des Übernahmegrundes und das erforderliche Fahrmanöver entweder in der Ankündigung enthalten oder nicht.

Aufgrund einer gewissen **Prädiktionsunsicherheit** ist nicht zu erwarten, dass Systemgrenzen und Übernahme-situationen in allen Fällen frühzeitig prädiziert werden können, beispielsweise wenn entsprechende Informationen nicht zur Verfügung stehen oder wenn Systemgrenzen plötzlich auftreten. Deswegen sollte in einem zweiten Studienteil überprüft werden, welche Auswirkungen das Ausbleiben der frühzeitigen Ankündigung auf das Fahrerverhalten hat. Konkret wurde untersucht, ob Fahrer bei Ausbleiben einer Ankündigung sicher auf plötzliche, dringliche Übernahmeaufforderungen reagieren können und inwiefern der Zeitpunkt der vorher erlebten Ankündigung das Übernahmeverhalten beeinflusst. Erwartet wurde eine höhere Übernahmezeit mit steigendem Zeitfenster der Ankündigung, da die Fahrer bei einer früheren Ankündigung an ein größeres Vorbereitungs-fenster gewöhnt waren als bei einer späteren Ankündigung.

3.2.2 Methodik

3.2.2.1 Versuchsumgebung

Wie in Studie 1 wurde der dynamische Fahrsimulator der WIVW GmbH genutzt. Das frontale Sichtfeld wurde seit Durchführung der ersten Studie auf 240° erweitert und setzt sich nun aus drei Bildkanälen mit einer Auflösung von je 1920×1200 Punkten zusammen. Das analoge Kombi-Instrument wurde durch ein fest installiertes LCD-Display ersetzt, so dass die Anzeigenpräsentation nicht mehr über ein separates Display erfolgen musste.

3.2.2.2 Versuchsdesign

Für die Studie wurde ein 3x2x2 within-subject-Design verwendet. Als unabhängige Variablen wurden Gestaltungsaspekte des HMI („Zeitpunkt der Ankündigung“, „Spezifität der Ankündigung“) sowie Aspekte der Fahrsituation („Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels“) variiert, die im Folgenden beschrieben werden.

3.2.2.2.1 Faktor „Zeitpunkt der Ankündigung“

Der **Zeitpunkt** der Ankündigung und die damit verbundene Vorbereitungszeit auf die Übernahme wurden in drei Stufen variiert:

- **500 Meter** bzw. **15 Sekunden** vor Ausgabe einer dringlichen Übernahmeaufforderung¹⁶
- **1000 Meter** bzw. **30 Sekunden** vor Ausgabe einer dringlichen Übernahmeaufforderung
- **2000 Meter** bzw. **60 Sekunden** vor Ausgabe einer dringlichen Übernahmeaufforderung

Der Ankündigungszeitpunkt wurde blockweise variiert, so dass die Fahrer jeden Zeitpunkt während einer separaten Fahrt erlebten. Die Reihenfolge der Fahrten wurde permutiert. Die Entfernung zur Systemgrenze wurde als Meterangabe in Form eines Abstandsbalkens und einer Digitalanzeige präsentiert (siehe Kapitel 3.2.2.3 zur Mensch-Maschine-Schnittstelle), da Distanzangaben in verschiedenen Studien gegenüber einer Angabe der verbleibenden Restzeit präferiert wurden (Holländer & Pfleging, 2018; Richardson et al., 2018) und eine Meterangabe nicht von der gefahrenen Geschwindigkeit abhängig ist. Im weiteren Verlauf wird deshalb eine Meterangabe angegeben, wenn vom „Zeitpunkt“ der Ankündigung die Rede ist.

¹⁶ Die Zeitangabe gilt für eine systembedingte Geschwindigkeit von 120 km/h.

3.2.2.2 Faktor „Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels“

Pro Fahrt mit einem der drei oben genannten Zeitpunkte erlebten die Versuchsteilnehmer vier angekündigte baustellenbedingte Übernahme-situationen. Um die situativen Anforderungen der Übernahme-situation zu variieren, befand sich die Baustelle entweder auf der Fahrspur des Fahrers oder auf dem Seitenstreifen. Pro Fahrt war in zwei Situationen ein Fahrstreifenwechsel notwendig, während die beiden anderen Situationen keinen Fahrstreifenwechsel erforderten.

3.2.2.3 Faktor „Spezifität der Ankündigung“

Die Spezifität der Vorankündigung wurde zweistufig variiert (spezifische vs. unspezifische Ankündigung). In der spezifischen Variante wurde eine Kombination aus handlungs- und richtungsspezifischen Anzeigen verwendet. Dabei wurde das auszuführende Manöver (Pfeildarstellung und Textbeschreibung „Spur wechseln“ oder „Auf Spur bleiben“) sowie der Ort der Baustelle (Baustellensymbol auf Fahrerspur oder Seitenstreifen) angezeigt. Im Falle von unspezifischen Ankündigungen wurde nur der Grund für die Übernahme anhand eines Baustellensymbols angezeigt.¹⁷ Möglich waren die folgenden Ausprägungen der Anzeigen, die sich aus der Kombination der Notwendigkeit des Fahrstreifenwechsels und der Spezifität ergeben (siehe auch Abbildung 26):

- **Spezifisch mit Fahrstreifenwechsel:** „Demnächst übernehmen und Spur wechseln“
- **Spezifisch ohne Fahrstreifenwechsel:** „Demnächst übernehmen und auf Spur bleiben“
- **Unspezifisch:** „Demnächst übernehmen“



Abbildung 26: Anzeigevarianten der Ankündigung.

¹⁷ Da den Fahrern über die Instruktion im Vorfeld bereits bekannt war, dass es sich bei den Übernahme-situationen um Baustellensituationen handeln würde, wird diese Anzeige als „unspezifisch“ bezeichnet, obwohl der Grund der Übernahme angezeigt wurde.

3.2.2.2.4 Fehlerfall: Ausbleiben der Situationsankündigung

Nach Erleben der vier Prüfsituationen in allen drei Zeitpunktbedingungen wurden die Probanden am Ende der dritten Fahrt mit einer weiteren Übernahmesituation (Baustelle mit Notwendigkeit zum Spurwechsel) konfrontiert. Diese wurde ihnen – im Gegensatz zu allen vorherigen Übernahmesituationen – nicht frühzeitig angekündigt, so dass sie auf die Ausgabe einer dringlichen Übernahmeaufforderung reagieren mussten.

3.2.2.3 Gestaltung der Fahrzeugautomation

Die Automation konnte durch Betätigung einer Taste am Lenkrad aktiviert werden. Bei aktiver Automation wurde die Längs- und Querregelung vollständig vom System übernommen (d. h. Halten einer systembedingten Geschwindigkeit von 120 km/h und Spurmittenzentrierung). Die aktive Automation konnte durch Betätigung des Bremspedals¹⁸, erneutes Betätigen der Lenkradtaste oder einen starken Lenkruck¹⁹ deaktiviert werden. Automatische Fahrstreifenwechsel waren nicht im Funktionsumfang enthalten. Im Falle einer Systemgrenze wurde in allen Bedingungen ein dreistufiger Übernahmeprozess initiiert, eingeleitet durch eine Situationsankündigung. Wenn innerhalb des jeweiligen Ankündigungszeitraums (siehe Kapitel 3.2.2.2.1 „Zeitpunkt der Ankündigung“) keine Übernahme der Fahrzeugkontrolle erfolgte, wurde eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben. Die Ausgabe der dringlichen Übernahmeaufforderung erfolgte 225 Meter vor Erreichen der Baustellenversperrung, was bei 120 km/h 6.75 Sekunden entsprach. Gleichzeitig wurde die Längsregelung beendet (d. h. das Fahrzeug beschleunigte nicht mehr, sondern verzögerte durch eine simulierte Motorbremse), während die Querregelung zunächst aufrechterhalten wurde. Erfolgte innerhalb von 3.5 Sekunden nach Erhalt der Übernahmeaufforderung keine Fahrerreaktion, initiierte die Automation ein Nothaltemanöver (Verzögerung: -10 m/s^2), die das Fahrzeug vor Erreichen der Baustelle zum Stehen brachte.²⁰ Nach Passieren der Übernahmesituation war das System wieder verfügbar.

3.2.2.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Um die Anforderungen der zweiten Studie zu erfüllen, wurden die visuellen Anzeigen vollständig überarbeitet. Die Ausgestaltung des HMI war in der zweiten Studie wie folgt:

¹⁸ Schwellwert: 10% des maximalen Bremspedalwegs

¹⁹ Schwellwert: 0.5 rad pro Sekunde

²⁰ In diesem Zustand konnte die Automation zusätzlich durch Betätigung des Fahrpedals (Schwellwert: 10% des maximalen Fahrpedalwegs) deaktiviert werden.

1. Gestaltung: Abbildung 27 zeigt die HMI-Anzeigen der Systemzustände „Automation aktiv“, „Ankündigung“ und „Übernahmeaufforderung“ im Kombi-Instrument. Im Unterschied zur ersten Studie wurde der aktive Systemzustand durch eine blaue Farbgebung dargestellt. Die Ankündigung wurde von einem Hinweiston begleitet, die Übernahmeaufforderung von einem dringlichen Ton.



Abbildung 27: Visuelle Anzeigen der Systemzustände „Automation aktiv“, „Ankündigung“ und „Übernahmeaufforderung“ im Kombi-Instrument.

2. Ort der Informationen: Die visuellen Informationen im Falle einer Ankündigung wurden zeitgleich im Kombi-Instrument und auf einem Tablet auf Höhe der oberen Mittelkonsole präsentiert, auf dem auch die fahrfremde Tätigkeit angezeigt wurde (siehe Abbildung 28).²¹

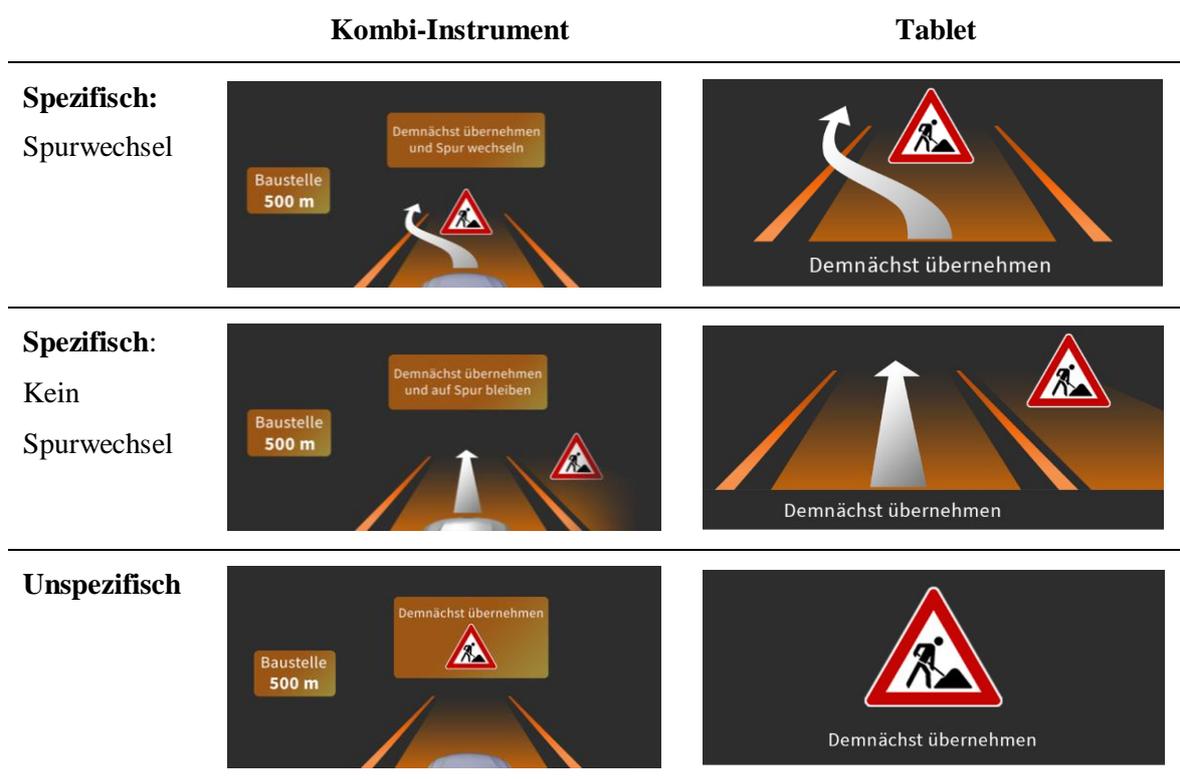


Abbildung 28: Ausprägungen der spezifischen und unspezifischen Ankündigung.

²¹ Vgl. Lapoehn et al. (2016), Melcher, Rauh, Diederichs, Widlroither und Bauer (2015) sowie Wintersberger, Riemer, Schartmüller, Frison und Weigl (2018) für eine Integration von Übernahmeinformationen auf mobilen Endgeräten zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten.

Um zu gewährleisten, dass die Fahrer die Informationen der Ankündigung wahrnehmen, während sie die fahrfremde Tätigkeit bearbeiten (d. h. vorgegebene Sätze abtippen, siehe Kapitel 3.2.2.5 zur Beschreibung der fahrfremden Tätigkeit), überlagerte die Situationsankündigung das Eingabefeld der Aufgabe für vier Sekunden (siehe Abbildung 29; vgl. Wintersberger, Riener et al., 2018). Während dieses Zeitraums waren keine Eingaben möglich. Anschließend war die Information der Ankündigung in verkleinerter Form über dem Eingabefeld sichtbar.

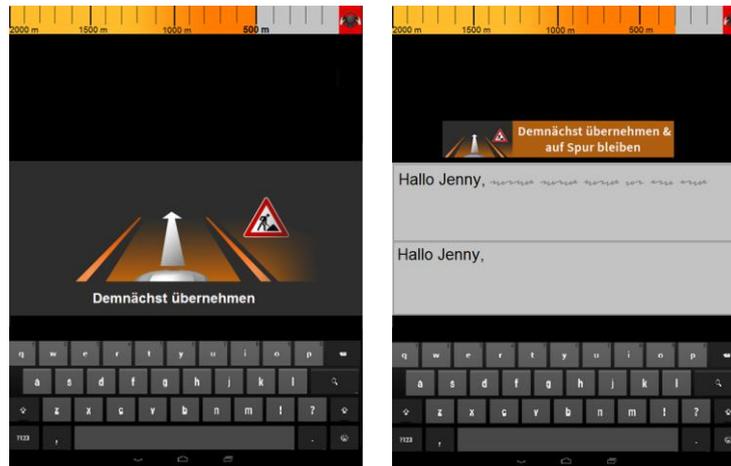


Abbildung 29: Ankündigung auf dem Tablet. Links: Überlagerung der Aufgabe; Rechts: Verkleinerte Darstellung nach Ablauf der Überlagerungszeit.

3. Distanzangabe bis zur Systemgrenze: Mit Auslösung der Ankündigung wurde die verbleibende Distanz bis zur Übernahme-situation mit Hilfe eines Abstandsbalkens am oberen Tabletrand angezeigt (siehe Abbildung 29). Die verbleibende Distanz bezog sich auf den Streckenpunkt, bei dem bei ausbleibender Fahrerreaktion eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben worden wäre. Der Balken bildete eine Distanz von 2000 Meter ab und füllte sich in Annäherung an die Situation in 100-Meter-Schritten von links nach rechts. Dabei änderte sich die Farbe von Gelb zu Rot, um die zunehmende Dringlichkeit bei Annäherung an die Systemgrenze zu verdeutlichen. In den Bedingungen, in denen die Ankündigung 1000 oder 500 Meter vor der Systemgrenze ausgegeben wurde, war der Balken bei Erscheinen bereits entsprechend gefüllt, um eine unterschiedliche Skalierung bzw. Füllgeschwindigkeit zwischen den verschiedenen Zeitpunktbedingungen zu vermeiden. Im Kombi-Instrument wurde die Distanzangabe in Form einer digitalen Meterangabe, die in 100-Meter-Schritten abwärts zählte, angezeigt (siehe Abbildung 28). Mit Kontrollübernahme des Fahrers waren die Entfernungsangaben nicht mehr sichtbar.

3.2.2.5 Fahrfremde Tätigkeit

Um die fahrfremde Tätigkeit an die Anforderungen der zweiten Studie anzupassen, wurde eine Aufgabe speziell für diese Studie entwickelt. Im Vergleich zur ersten Studie wurde dabei auf eine

höhere Realitätsnähe sowie die Möglichkeit zur Unterbrechung Wert gelegt. Da die Beschäftigung mit visuell-manuellen Tätigkeiten mit steigendem Automatisierungsgrad zu erwarten ist (de Winter et al., 2014) und sich das Verfassen von Textnachrichten beim manuellen Fahren durch eine hohe Gesamtblickabwendungsdauer kennzeichnet (Schömig, Schoch, Neukum, Schumacher, & Wandtner, 2015) wurde das Schreiben von Nachrichten als Aufgabe gewählt. Ähnliche Aufgaben wurden beispielsweise von Holländer und Pflöging (2018), Wandtner et al. (2018b) oder Wintersberger und Riemer et al. (2018) verwendet. Bei der Aufgabe mussten Sätze unterschiedlicher Länge, die auf einem in der Mittelkonsole angebrachten Tablet dargeboten wurden, abgetippt werden (siehe Abbildung 30). Durch die permanente Anzeige des Textes sollte der Einfluss von Gedächtniseffekten auf die Aufgabenbearbeitung kontrolliert werden, da sich die Probanden die Sätze nicht – wie im Fall einer auditiven Darbietung – merken mussten. Auch unterschiedliche Textschwierigkeiten sollten auf diese Weise kontrolliert werden, wobei Schartmüller, Riemer, Wintersberger und Frison (2018) bei einem Vergleich unterschiedlicher Textschwierigkeiten keinen Einfluss dieses Merkmals auf die Übernahmezeit fanden. Um einen Anreiz für die kontinuierliche Aufgabenbearbeitung zu schaffen, wurde ein Belohnungssystem eingeführt (Punkte für richtig abgetippte Wörter), über das die Probanden zusätzlich zur Aufwandsentschädigung für die Studienteilnahme eine monetäre Belohnung erhielten. Um Punkte gutgeschrieben zu bekommen, musste die Enter-Taste auf der Tastatur betätigt werden, nachdem eine Aufgabe vollständig abgeschrieben worden war. Anschließend wurden die in der Aufgabe erzielten Punkte sowie die bis zu diesem Zeitpunkt erreichte Gesamtpunktzahl einer Fahrt auf dem Tablet visuell rückgemeldet.

Wenn während der Aufgabe zu lange (d. h. länger als 10 Sekunden) keine Eingabe erfolgte, oder die Aufgabe am Ende nicht rechtzeitig eingeloggt wurde, wurde die Aufgabe vom System abgebrochen und keine Punkte gutgeschrieben.

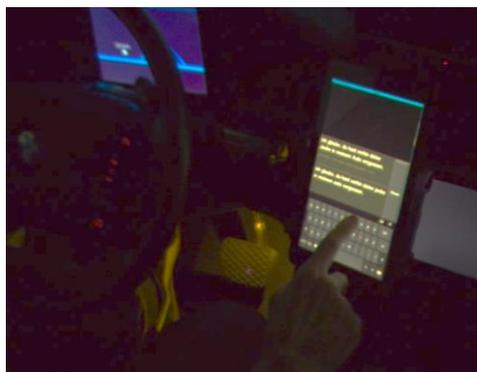


Abbildung 30: Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit.

Um den Prozess der selbstbestimmten Ablösung von der fahrfremden Tätigkeit im Vorfeld einer Kontrollübernahme untersuchen zu können, begann eine Aufgabe immer vor der Ausgabe der Ankündigung zum selben Zeitpunkt. Die Satzlänge war so gewählt, dass die Sätze nicht

rechtzeitig vor einer Übernahme beendet werden konnten. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunktbedingungen resultierte dies in unterschiedlichen Satz­längen pro Bedingung.

Die Fahrer konnten selbst entscheiden, wie lange sie die Aufgabe (d. h. einen Satz) nach der Ankündigung weiterbearbeiteten, bevor sie den Satz unterbrachen. Die einzelnen Wörter eines Satzes sollten stellvertretend für kurze Teilaufgaben stehen (Adamczyk & Bailey, 2004; Monk, Boehm-Davis, Mason et al., 2004). Die Aufgabe des Fahrers sollte sein, sich in Annäherung an eine Systemgrenze entscheiden zu müssen, wie viele Teilaufgaben er noch auszuführen will und nach Erreichung eines Teilziels (Schreiben eines Wortes) die Gesamtaufgabe an einer sog. *task boundary* zu unterbrechen. Die Gesamtaufgabe konnte durch Betätigung der Pause-Taste unterbrochen werden und bei erneuter Systemaktivierung nach der manuellen Übernahme­situation durch wiederholte Betätigung der Pause-Taste wiederaufgenommen und zu Ende geführt werden.

Um die Entscheidung zur Weiterführung oder Unterbrechung der Aufgabe aus Probandensicht bedeutender zu machen, wurden negative Konsequenzen in Form eines Punktabzugs bei Fehlentscheidungen eingeführt. Fehlentscheidungen bestanden darin, ein angefangenes Wort aufgrund der Entfernung zur Systemgrenze nicht zu Ende schreiben zu können oder inmitten eines Wortes zu pausieren (5 Punkte Abzug bei Unterbrechung inmitten eines Wortes, d. h. bevor eine sog. *task boundary* erreicht wurde). Bei einer ausbleibenden Pausierung bevor eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde, wurden 30 Punkte abgezogen und die Aufgabe systemseitig abgebrochen. Tabelle 27 gibt eine Übersicht über die Gründe für Aufgabenabbrüche und Punktabzüge.

Tabelle 27: Übersicht über Gründe für Aufgabenabbrüche und Punktabzüge.

Handlung	Aufgabenabbruch	Punktabzug
Zu lange keine Eingabe (10 s)	x	
Kein Einloggen der Aufgaben nach Beendigung	x	
Pausierung inmitten eines Wortes		x
Nicht-Pausierung vor Übernahmeaufforderung	x	x

Da die Anzahl der bereits geschriebenen Wörter möglicherweise die Motivation zur Weiterbearbeitung der Aufgabe und dadurch den Unterbrechungszeitpunkt beeinflussen kann, wurden mehrere Maßnahmen zur Sicherstellung des gleichen Aufgabenfortschritts (Anzahl bereits geschriebener Wörter) im Moment der Ankündigung in allen Versuchsbedingungen ergriffen:

- Konstanter Aufgabenbeginn vor der Ankündigung: Die Anzeige des abzuschreibenden Texts der Aufgabe vor einer Übernahme begann stets 10 Sekunden vor der Situationsankündigung.
- Vergleichbare Wortlänge: Alle Sätze wurden in Bezug auf die Länge der Wörter nach demselben Muster konstruiert. In der Annäherung an die Systemgrenze wurde dadurch eine Vergleichbarkeit der Sätze in den letzten 500 Meter (hier überlappen alle

Zeitpunktbedingungen) bzw. 1000 Meter (hier überlappen die 1000 m- und 2000 m-Bedingung) angestrebt.

- Zeitliche Taktung zur Kontrolle der individuellen Tippgeschwindigkeit: Die abzuschreibenden Wörter wurden mit Beginn der Aufgabe zunächst maskiert dargestellt (siehe Abbildung 31). Erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit (850 ms pro Buchstabe) wurde ein neues Wort sichtbar. Anhand der Markierung war erkennbar, wie viele Wörter innerhalb eines Satzes noch zu schreiben sind, ohne dass Probanden „vorschreiben“ konnten. Wortvorschläge und Autokorrektur waren deaktiviert.

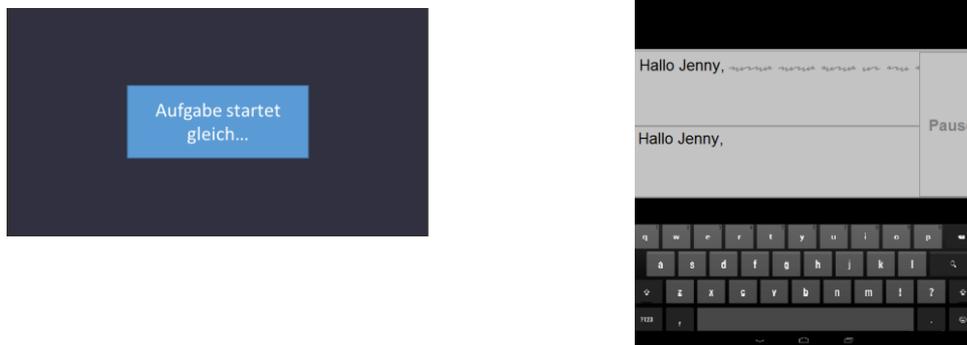


Abbildung 31: Tätigkeit integriert in Tablet-Lösung. Startbildschirm, der eine Aufgabe zusammen mit einem auditiven Hinweis ankündigte (links), abzutippende Aufgabe (rechts).

Um der Erwartung, dass eine Aufgabe immer durch eine Übernahmesituation unterbrochen wird, entgegenzusteuern, wurden zusätzliche Distraktor-Aufgaben eingeführt. Diese konnten in den Zwischenstücken zwischen den Übernahmesituationen ohne Unterbrechung bearbeitet werden und hatten unterschiedliche Längen. Die Anzahl sowie die Länge der Sätze innerhalb der verschiedenen automatisierten Fahrtabschnitte variierte, wobei die Aufgabenanzahl sowie die Satzlängen über die drei Fahrten mit unterschiedlichen Zeitpunktbedingungen vergleichbar waren.

3.2.2.6 Versuchssituationen

3.2.2.6.1 Hauptversuch

Die Strecke bestand aus einer zweistreifigen Autobahn ohne Geschwindigkeitsbeschränkung mit geraden und kurvigen Abschnitten. Auf der Fahrerspur (rechter Fahrstreifen) befand sich während der Fahrt kein Verkehr, wohingegen auf dem linken Fahrstreifen dichter Verkehr herrschte (Geschwindigkeit > 120 km/h). Die meiste Zeit konnten die Probanden die Automation ohne die Notwendigkeit eines Eingriffs nutzen, um sich der fahrfremden Tätigkeit zu widmen. Die vier

Übernahmesituationen bestanden jeweils aus einer Baustelle mit fehlenden Fahrstreifenmarkierungen (Länge: 550 m). Die Baustelle befand sich entweder auf der Spur des Fahrers oder dem Standstreifen, so dass in zwei Situationen ein Fahrstreifenwechsel erforderlich war, in den anderen beiden nicht (siehe Abbildung 32).



Abbildung 32: Links: Übernahmesituation „Baustelle auf Fahrerspur“ (Fahrstreifenwechsel erforderlich); Rechts: „Baustelle auf Standstreifen“ (kein Fahrstreifenwechsel erforderlich).

Damit der Ort der Baustelle und das erforderliche Fahrmanöver nicht frühzeitig aus der Fahrsituation erkennbar waren, sondern der spezifischen HMI-Anzeige entnommen werden konnten, befand sich die Situation hinter einer Rechtskurve mit dichter Randbepflanzung. 225 Meter vor Erreichen der Versperrung befand sich ein Baustellenschild an der Stelle, an der bei Nicht-Reaktion des Fahrers eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde. Um den Spurwechselzeitpunkt nicht durch den Verkehr zu beeinflussen, war der linke Fahrstreifen in der Übernahmesituation nicht belegt. Nach dem Durchfahren der Baustelle wurde das System wieder verfügbar, so dass die unterbrochene Aufgabe fertig bearbeitet werden konnte. Die Länge der Fahrtabschnitte zwischen den Übernahmesituationen betrug zwischen 7500 und 8500 Meter. Die Länge einer Fahrt betrug ca. 43 km. Abbildung 33 gibt eine Übersicht über den Verlauf einer Fahrt.

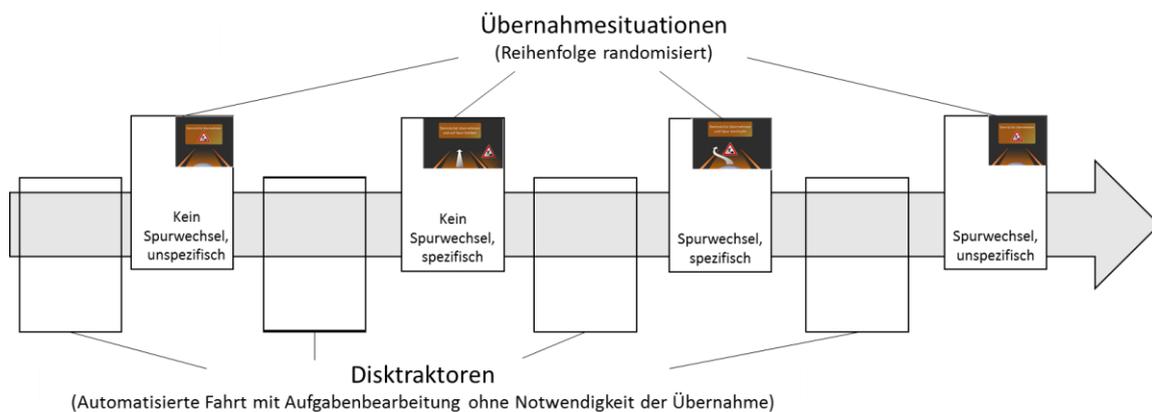


Abbildung 33: Übersicht über den Ablauf einer Fahrt.

3.2.2.6.2 Fehlerfall

In der letzten der drei Fahrten wurde nach Absolvieren der vier regulären Übernahmesituationen eine zusätzliche Übernahmesituation erlebt, in der keine Situationsankündigung ausgegeben wurde. Stattdessen erlebten die Fahrer während der Aufgabenbearbeitung plötzlich eine dringliche Übernahmeaufforderung. Bei der Situation handelte es sich um eine Baustellensituation mit der Notwendigkeit zum Fahrstreifenwechsel. Um Erwartungseffekte zu minimieren, bearbeiteten die Fahrer nach der letzten Übernahmesituation der ersten beiden Fahrten weitere Aufgaben, bevor die Fahrt beendet wurde.

3.2.2.7 Abhängige Variablen

Um die Effekte der Spezifität und des Zeitpunkts von Vorinformationen zu evaluieren, wurden die folgenden Maße erfasst.

3.2.2.7.1 Zeitliche Aspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Um den Einfluss der experimentellen Faktoren auf zeitliche Aspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle zu untersuchen, werden die folgenden Maße berechnet.

- **Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die fahrfremde Tätigkeit unterbrechen.²² Eine Pausierung war erst nach Ablauf der vier Sekunden Überlagerungszeit der Ankündigung möglich.
- **Zeitpunkt der Handerkennung:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Hände ans Lenkrad nehmen.
- **Deaktivierungszeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Automation deaktivieren.
- **Manöverzeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem sich der Schwerpunkt des simulierten Probandenfahrzeugs bei einem erforderlichen Fahrstreifenwechsel erstmalig auf dem benachbarten Fahrstreifen befindet.
- **Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Aufgabe:** Meterabstand, bei dem die Aufgabe nach der manuellen Fahrt wieder aufgenommen wird, gemessen ab dem Zeitpunkt, zu dem die Automation nach dem Durchfahren der Baustelle wieder verfügbar war.

²² Als Referenzpunkt der Systemgrenze dient der Streckenpunkt, an dem eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben worden wäre (225 Meter vor Baustellenversperrung).

3.2.2.7.2 Qualitätsaspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Zur Beurteilung der Übernahmequalität wurden die maximale Längs- und Querbeschleunigung herangezogen.

- **Maximale Längsverzögerung:** Maximal aufgetretene Längsverzögerung [m/s^2] zwischen der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung und dem Erreichen der Baustellenversperrung.²³
- **Maximale Querbeschleunigung:** Maximal aufgetretene Querbeschleunigung [m/s^2] zwischen der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung und dem Erreichen der Baustellenversperrung.

3.2.2.7.3 Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit

Um die Auswirkung der Vorbereitung der Kontrollübernahme auf die Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit zu untersuchen, wird die Aufgabenbearbeitung nach der Ausgabe der Situationsankündigung betrachtet.

- **Anzahl eingegebener Wörter:** Anzahl der Wörter, die nach Ausgabe der Ankündigung noch geschrieben werden.
- **Korrekturrate:** Anzahl der korrigierten Tippfehler gemessen an der Anzahl der geschriebenen Worte vor Pausierung bzw. Abbruch der Aufgabe. Die *total error rate* (siehe bspw. Schartmüller et al., 2018), die auch nicht-korrigierte Fehler im geschriebenen Text enthalten hätte, konnte aufgrund der ungenügenden Videoqualität zur Nachkodierung nicht verwendet werden.²⁴

3.2.2.7.4 Blickverhalten

Das Überwachungsverhalten in Annäherung an Systemgrenzen wurde anhand des Blickverhaltens gemessen. Die Aufzeichnung erfolgte über ein kamerabasiertes Blickerfassungssystem, aufgrund nicht ausreichender Qualität der Datenaufzeichnung wurden die Blicke jedoch manuell nachkodiert.

²³ Im Gegensatz zu Studie 1 wurden in Studie 2 und 3 die Qualitätsmaße für den Bereich ab Deaktivierung bis zu einem definierten Meterabstand bestimmt, da hierdurch die Datengrundlage besser vergleichbar wird. In der ersten Studie konnte dies durch einen Fehler in der Datenaufzeichnung, durch den der Meterabstand ab der Systemgrenze in manchen Situationen nicht bestimmt werden konnte, nicht geschehen.

²⁴ Die genauen Texteingaben des Fahrers wurden nicht miterhoben.

- **Prozentuale Blickverteilung ab Ankündigung:** Blickverteilung zwischen der fahrfremden Tätigkeit und Blicken auf die Fahrbahn, die Spiegel oder das Kombi-Instrument während der Annäherung an die Fahrsituation im Zeitraum von 500 Meter vor der Systemgrenze bis zum Erreichen der Baustellenversperrung.
- **Prozentualer Anteil an Kontrollblicken ab 500 Meter vor Systemgrenze:** Mittlerer prozentualer Anteil der Kontrollblicke auf die Fahrsituation (Fahrbahn- und Spiegelblicke vgl. van der Heiden et al., 2017) ab 500 Meter vor der Systemgrenze bis zum Erreichen der Baustellenversperrung.

3.2.2.7.5 Selbstberichte

Um das subjektive Erleben der Probanden beim Wechsel zwischen den fahrfremden Tätigkeiten und der Fahraufgabe sowie den präferierten Zeitpunkt zu evaluieren, wurden verschiedene Selbstberichtsmaße erhoben.

3.2.2.7.5.1 Fahrtbefragung

Nach jeder Übernahme-situation sollten die Fahrer den Zeitpunkt der Vorankündigung und deren Nützlichkeit auf einer 15-stufigen Kategorienunterteilung-Skala bewerten (Heller, 1985). Die Befragung wurde durchgeführt, als das System wieder aktiviert war und die Probanden ihre unterbrochene Aufgabe beendet hatten. Zusätzlich wurden die Probanden gebeten, die Situationskritikalität zu beurteilen (Neukum et al., 2008). Die beiden noch nicht in Studie 1 verwendeten Skalen finden sich in Abbildung 34.

- **Nützlichkeit der Ankündigung:** „Wie hilfreich war die Ankündigung?“ [0...15]
- **Angemessenheit des Ankündigungszeitpunkts:** „Wie bewerten Sie den Zeitpunkt der Ankündigung?“ [-3 ...+3]
- **Situationskritikalität:** „Wie bewerten Sie die Situation?“ (Neukum et al., 2008; [0-10]; siehe Studie 1)

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

viel zu früh	Zu früh	etwas zu früh	genau richtig	etwas zu spät	zu spät	viel zu spät
--------------	---------	---------------	---------------	---------------	---------	--------------

Abbildung 34: Skala zur Erfassung der Nützlichkeit (oben) und Angemessenheit des Zeitpunkts (unten).

3.2.2.7.5.2 Nachbefragung

Nach Absolvierung aller Fahrten wurden die Probanden zusätzlich nach ihrer Präferenz hinsichtlich des Präsentationszeitpunkts und der Spezifitätsbedingung befragt.

3.2.2.8 Stichprobe

An der Studie nahmen 25 Fahrer (10 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 33.5 Jahren (Altersspanne: 23-58 Jahre; jährliche Fahrleistung: 17290 km; SD = 10592) teil, die aus dem WIVW-Testfahrerpanel (siehe Studie 1 Kapitel 3.1.2.8) rekrutiert wurden.

3.2.2.9 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung und dem Ausfüllen der Datenschutzerklärung wurden die Teilnehmer über den Studienablauf aufgeklärt. Vor der Durchführung der Messfahrten erfolgte eine ausführliche Eingewöhnungsfahrt, die folgende Ziele verfolgte:

- Erklärung der Funktions- und Bedienweise des automatisierten Systems mit anschließender Übungsfahrt
- Erläuterung des Konzepts von frühzeitigen Situationsankündigungen und deren Elementen anhand von Bildmaterial
- Erleben der Ankündigung, dringlichen Übernahmeaufforderung und eines Nothaltemanövers während der Fahrt²⁵
- Instruktion über Bedienung und Regeln der fahrfremden Tätigkeit sowie Üben der Aufgabe während der Fahrt, in Verbindung mit einer Ankündigung mit und ohne Pausierung, um den systembedingten Aufgabenabbruch durch die Ausgabe der Übernahmeaufforderung zu erleben.²⁶

Am Ende der Eingewöhnungsfahrt hatten die Probanden alle Kombinationen aus Baustellenszenario und Anzeigeformat (Spurwechsel ja/nein; unspezifisch/spezifisch) erlebt. Auf diese Weise wurde verhindert, dass es sich bei der Messfahrt um den Erstkontakt mit dem System handelte, da die Erfahrung mit Übernahmesituationen die Übernahmeleistung beeinflusst (siehe bspw. Gold, 2016; Körber et al., 2016; Wandtner, 2018).

Während der Messfahrten absolvierte jeder Fahrer drei Fahrten mit je einem unterschiedlichen Zeitpunkt der Ankündigung. Die Fahrer wurden einer von sechs Reihenfolgen, in denen die Fahrten erlebt werden konnten, zufällig zugewiesen. Für die Darbietung der vier Übernahmesituationen pro Fahrt wurden insgesamt vier Reihenfolgen verwendet, um

²⁵ Der Zeitpunkt der Ankündigung in der Übungsfahrt entsprach dabei dem Zeitpunkt, der in der ersten Testfahrt erlebt wurde.

²⁶ Von der Fehlerkorrektur in bereits abgeschlossenen Wörtern wurde den Fahrern abgeraten, da bei Löschen (und erneutem Schreiben) von bereits geschriebenen Wörtern ein Fertigstellen der Aufgabe innerhalb der vorgegebenen Zeit aufgrund der zeitlichen Taktung nicht garantiert werden konnte.

sicherzustellen, dass sich die Situationsabfolge innerhalb der drei Fahrten eines Probanden nicht wiederholte. Die Fahrer wurden instruiert, zu einem selbstgewählten, komfortablen Zeitpunkt zu übernehmen (Eriksson & Stanton, 2017a). Nach jeder Übernahme-situation fand die Befragung zur Nützlichkeit der Ankündigung, Angemessenheit des Zeitpunkts sowie der Situationskritikalität statt. Am Ende der dritten Fahrt ereignete sich die Fehlersituation. Nach Abschluss der dritten Fahrt wurde die Nachbefragung durchgeführt. Die Gesamtdauer des Versuchs betrug ca. 2.5 Stunden.

3.2.3 Ergebnisse

3.2.3.1 Vorgehen bei der Datenauswertung

Die Analyse gliedert sich in Ergebnisse zur regulären Fahrt (= korrekte Ankündigung der Übernahme-situation, Studienteil A) und zum Fehlerfall (= plötzliche Übernahmeaufforderung bei ausbleibender Ankündigung, Studienteil B). Zur Analyse der regulären Fahrt wurden jeweils vollfaktorielle ANOVAs mit den within-subject-Faktoren „Zeitpunkt der Ankündigung“ (500 m vs. 1000 m vs. 2000 m), „Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels“ (ja vs. nein) und „Spezifität der Ankündigung“ (spezifisch vs. unspezifisch) durchgeführt. Für die within-subject-Faktoren werden stets multivariate Statistiken berichtet. Es wird ein generelles Signifikanzniveau von .05 angenommen, Nachtests werden nach Bonferroni adjustiert. Post-hoc-Tests zwischen Einzelbedingungen werden nur dann uneingeschränkt interpretiert, wenn der zugehörige vollfaktorielle Globaltest signifikant ist. Signifikante Effekte werden grafisch dargestellt.

Die Voraussetzungen der ANOVA wurden geprüft. Mauchly's Test auf Sphärität war in den meisten Fällen nicht signifikant (9 von 44 Fällen). Die Normalverteilungsannahme kann basierend auf dem K-S-Test ebenfalls in den meisten Fällen als gegeben angesehen werden (37 von 126 Fällen lieferten ein signifikantes Ergebnis des K-S-Tests). Aufgrund der generellen Robustheit der ANOVA auf Verletzungen ihrer Voraussetzungen bei Verwendung multivariater Statistiken wurde die Interpretation der Ergebnisse als gerechtfertigt angesehen (O'Brien & Kaiser, 1985). In 6 von 11 untersuchten Variablen traten vereinzelt Extremwerte auf (+/- 3 Standardabweichungen vom Gruppenmittelwert entfernt), die aufgrund des within-subject-Designs (d. h. ein Ausschluss eines Wertes hätte zum Ausschluss aller Werte des jeweiligen Probanden geführt) im Datenset belassen wurden.

Bei der Analyse des Fehlerfalls wurde pro Variable eine between-subjects-ANOVA mit dem Faktor „Zeitpunkt der Ankündigung“ durchgeführt. Der Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen ist bei keiner der Variablen signifikant, so dass diese Voraussetzung als gegeben angesehen werden kann. K-S-Tests auf Normalverteilung sind bei 3 von 6 Variablen signifikant,

Extremwerte traten bei 2 der 6 Variablen auf. Aufgrund der vergleichbaren Gruppengrößen und der generellen Robustheit der ANOVA wird der Einsatz der inferenzstatistischen Verfahren als gerechtfertigt angesehen (Field, 2009). Die Analyse der Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit erfolgte explorativ aufgrund stark ungleicher Zellbesetzung durch fehlende Fälle.

3.2.3.1.1 Fehlende Fälle

Bei zwei Fahrern traten technische Probleme mit der Situationsabfolge in der 500 m-Ankündigungsbedingung auf, weswegen die Übernahmesituation „kein Spurwechsel“ mit spezifischer Anzeige sowie die Fehlersituation bei diesen Fahrern nicht zu Stande kamen. Diese Datenpunkte fehlen für alle Berechnungen der abhängigen Variablen mit Ausnahme der Nachbefragung. Weitere fehlende Werte bei speziellen Variablen werden an entsprechender Stelle berichtet.

3.2.3.2 Studienteil A: Reguläre Fahrt

3.2.3.2.1 Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe

In acht Fällen fehlen Werte, da die Probanden entweder nicht pausierten, schon vor der Ankündigung pausierten oder ein Datenaufzeichnungsfehler vorlag (d. h. die Situation fehlte entweder vollständig in den Daten oder die Betätigung der Pause-Taste wurde aufgrund eines Softwarefehlers oder zu leichten Tastendrucks nicht aufgezeichnet). Nur in einem Fall wurde die Aufgabe durch die Ausgabe einer Übernahmeaufforderung abgebrochen. Tabelle 96 im Anhang ordnet die Vorkommnisse den jeweiligen Bedingungen zu.

Die inferenzstatistische Analyse ergibt einen signifikanten Haupteffekt des Zeitpunkts der Ankündigung (siehe Tabelle 28). Je früher die Ankündigung erfolgt, desto früher wird die Aufgabe pausiert (siehe Abbildung 35). Geplante Kontraste zeigen, dass sich die beiden frühen Ankündigungsbedingungen (1000 m und 2000 m) zwar signifikant von der späten Ankündigung unterscheiden, aber nicht untereinander (siehe Tabelle 29). Es findet sich kein statistisch signifikanter Einfluss der Spezifität und der situationellen Anforderung, ob ein Spurwechsel auszuführen ist oder nicht, auf den Zeitpunkt des Pausierens. Auch die Interaktion ist nicht statistisch signifikant.

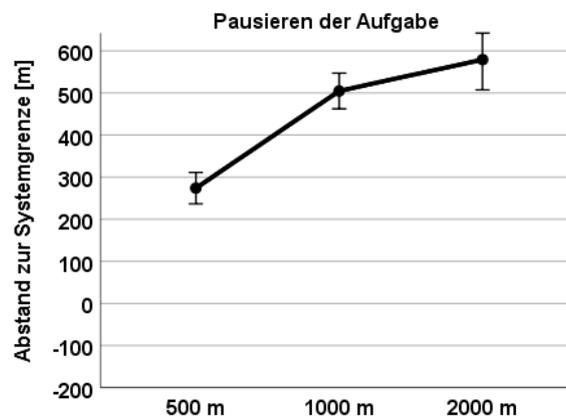


Abbildung 35: Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 28: ANOVA Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	15.76	2	16	<.001	0.66
Spezifität	0.03	1	17	.858	0.00
Spurwechsel	1.13	1	17	.303	0.06
Zeitpunkt * Spezifität	1.38	2	16	.279	0.15
Zeitpunkt * Spurwechsel	3.13	2	16	.071	0.28
Spezifität * Spurwechsel	0.10	1	17	.760	0.01
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	1.95	2	16	.175	0.20

Tabelle 29: Kontraste Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe zwischen den Ankündigungszeitpunkten. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	32.82	1	17	<.001	0.66
500 vs. 2000	23.37	1	17	<.001	0.58
1000 vs. 2000	3.08	1	17	.097	0.15

3.2.3.2.2 Zeitpunkt der Handerkennung

Wie aus Abbildung 36 ersichtlich, führt ein früherer Ankündigungszeitpunkt dazu, dass die Fahrer ihre Hände früher ans Lenkrad nehmen (siehe Tabelle 30). Beim Vergleich der unterschiedlichen Zeitpunkte zeigt sich, dass die Fahrer der 500 m-Bedingung ihre Hände später ans Lenkrad nehmen als bei 1000 m, die Werte bei 1000 m und 2000 m aber auf einem vergleichbaren Niveau liegen (Tabelle 31). Es findet sich kein statistisch signifikanter Einfluss der Spezifität und der situationellen Anforderung auf den Zeitpunkt der Handerkennung. Auch die Interaktion ist nicht signifikant.

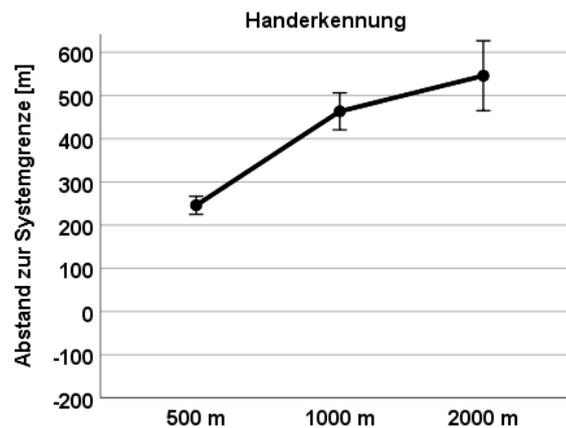


Abbildung 36: Zeitpunkt der Handerkennung, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 30: ANOVA Zeitpunkt der Handerkennung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	20.38	2	21	<.001	0.66
Spezifität	0.32	1	22	.578	0.01
Spurwechsel	0.65	1	22	.429	0.03
Zeitpunkt * Spezifität	0.11	2	21	.900	0.01
Zeitpunkt * Spurwechsel	0.16	2	21	.850	0.02
Spezifität * Spurwechsel	0.11	1	22	.743	0.01
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.27	2	21	.764	0.03

Tabelle 31: Kontraste Zeitpunkt der Handerkennung zwischen den Ankündigungszeitpunkten. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	42.62	1	22	<.001	0.66
500 vs. 2000	20.17	1	22	<.001	0.48
1000 vs. 2000	2.86	1	22	.105	0.12

3.2.3.2.3 Deaktivierungszeitpunkt

Dasselbe Muster der vorherigen Variable (d. h. signifikanter Haupteffekt des Zeitpunkts, nicht signifikanter Effekt der Spezifität und Situationsanforderung) wird auch bei der Distanz zur Systemgrenze, bei der die Automation deaktiviert wird, gefunden (siehe Abbildung 37 und Tabelle 32). Wiederum zeigt sich der Vorteil der verschiedenen Ankündigungszeitpunkte, indem Fahrer bei 1000 m früher zurück zum manuellen Fahren kehren als bei der 500 m-Bedingung, wohingegen eine noch frühere Darbietung keinen zusätzlichen Vorteil zu bieten scheint (siehe Tabelle 33).

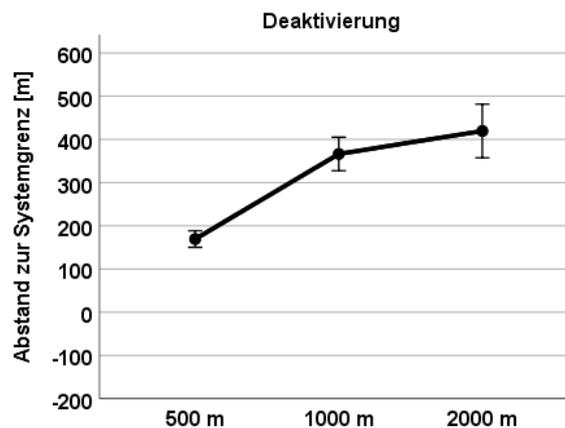


Abbildung 37: Deaktivierungszeitpunkt, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 32: ANOVA Deaktivierungszeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	31.76	2	21	<.001	0.75
Spezifität	0.31	1	22	.587	0.01
Spurwechsel	0.02	1	22	.877	0.00
Zeitpunkt * Spezifität	0.28	2	21	.761	0.03
Zeitpunkt * Spurwechsel	1.33	2	21	.286	0.11
Spezifität * Spurwechsel	0.46	1	22	.504	0.02
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	3.20	2	21	.061	0.23

Tabelle 33: Kontraste Deaktivierungszeitpunkt zwischen den Ankündigungszeitpunkten. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	65.24	1	22	<.001	0.75
500 vs. 2000	22.65	1	22	<.001	0.51
1000 vs. 2000	1.78	1	22	.196	0.08

Die allermeisten Fahrer übernehmen die manuelle Fahrzeugkontrolle vor der Ausgabe der dringlichen Übernahmeaufforderung. In sechs Fällen wird eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgelöst, weil das System nicht rechtzeitig deaktiviert wurde (siehe Tabelle 34). Dies geschieht vier Mal in der 500 m-Bedingung sowie jeweils einmal bei 1000 m und 2000 m.

Tabelle 34: Fälle, in denen eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben wird.

Zeitpunkt	Spezifität	Spurwechsel	Anzahl Übernahmeaufforderungen
500	unspezifisch	Kein Spurwechsel	1
500	unspezifisch	Spurwechsel	1
500	spezifisch	Kein Spurwechsel	1
500	spezifisch	Spurwechsel	1
1000	unspezifisch	Kein Spurwechsel	1
2000	unspezifisch	Kein Spurwechsel	1

3.2.3.2.4 Manöverzeitpunkt

In den bisher betrachteten Variablen der Übernahmezeit zeigt sich kein signifikanter Effekt der Anzeigenspezifität. Wird jedoch die Entfernung zur Systemgrenze betrachtet, bei der die Fahrer den erforderlichen Fahrstreifenwechsel in den Spurwechselszenarien durchführen, erweist sich die Spezifität als nützlich. Sowohl der Effekt des Zeitpunkts, der Spezifität und der Interaktionseffekt der beiden Faktoren ist statistisch signifikant (siehe Abbildung 38 und Tabelle 35). Bei spezifischen Ankündigungen werden die Manöver unabhängig vom Zeitpunkt früher ausgeführt als bei unspezifischen Ankündigungen (siehe Tabelle 36).

Der Effekt des Zeitpunkts hängt von der Spezifität der Ankündigungen ab. Nachtests pro Spezifitätsbedingung (unspezifisch vs. spezifisch) ergeben, dass der Zeitpunkt der Ankündigung nur bei spezifischen Informationen einen tendenziellen Effekt auf den Manöverzeitpunkt hat (siehe Tabelle 37). Zum Vergleich der Zeitpunktbedingungen wurden geplante Kontraste durchgeführt. Wenn die Fahrer in der 1000 m-Bedingung spezifische Informationen darüber erhalten, dass ein Spurwechsel erforderlich ist, führen sie das Manöver verglichen mit der 500 m-Bedingung früher aus. Der Unterschied zwischen 500 m und 2000 m bzw. 1000 m und 2000 m ist hingegen nicht statistisch signifikant (siehe Tabelle 38).

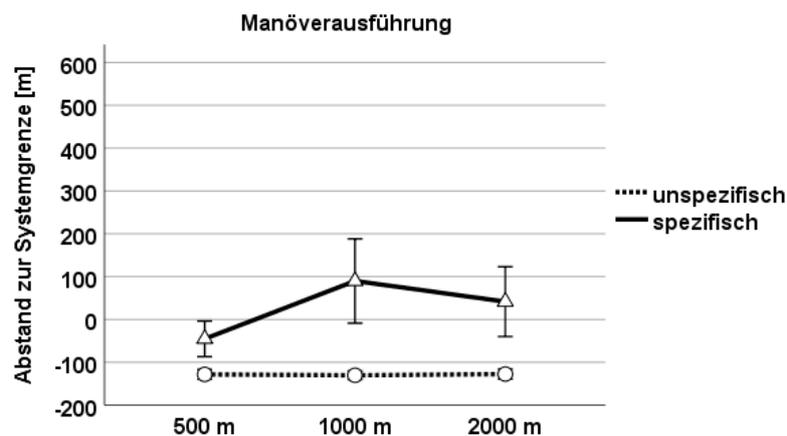


Abbildung 38: Manöverzeitpunkt, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 35: ANOVA Manöverzeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	3.64	2	23	.042	0.24
Spezifität	36.78	1	24	<.001	0.61
Zeitpunkt * Spezifität	4.49	2	23	.023	0.28

Tabelle 36: Nachtest-ANOVA Manöverzeitpunkt, Effekt der Spezifität getrennt nach Ankiündigungszeitpunkt. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Zeitpunkt	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500	Spezifität	19.17	1	24	<.001	0.44
1000	Spezifität	24.57	1	24	<.001	0.51
2000	Spezifität	20.27	1	24	<.001	0.46

Tabelle 37: Nachtest-ANOVA Manöverzeitpunkt, Effekt des Ankiündigungszeitpunkts getrennt nach Spezifität. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Spezifität	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Unspezifisch	Zeitpunkt	0.40	2	23	.673	0.03
Spezifisch	Zeitpunkt	4.11	2	23	.030	0.26

Tabelle 38: Kontraste Manöverzeitpunkt zwischen den Ankiündigungszeitpunkten in spezifischer Bedingung. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	8.56	1	24	.007	0.26
500 vs. 2000	4.12	1	24	.054	0.15
1000 vs. 2000	0.98	1	24	.332	0.04

Unnötige Fahrstreifenwechsel: In 12 von insgesamt 148 Situationen, die keinen Fahrstreifenwechsel erfordern, führen Probanden trotzdem einen Spurwechsel durch oder beabsichtigen diesen (angezeigt durch Blinken, ohne diesen durchzuführen). Abbildung 39 zeigt eine Verteilung der Häufigkeit zugeordnet zu den einzelnen Bedingungen. Dabei ist auffällig, dass dies gehäuft in der Bedingung mit dem Zeitpunkt 2000 m in der unspezifischen HMI-Bedingung vorkommt. In drei der Fälle wurde jedoch spezifisch angezeigt, dass kein Spurwechsel erforderlich war. Ein Grund dafür kann darin liegen, dass die Anzeige nach der Systemdeaktivierung nicht mehr sichtbar war. Dies könnte zur Folge gehabt haben, dass die Probanden die Information bei einer frühzeitigen Übernahme anschließend nicht mehr präsent hatten. Die Tatsache, dass die meisten Fälle in der ersten Fahrt auftreten, kann ein Hinweis auf die Lernerfahrung sein, dass nicht in allen Übernahmesituationen ein Fahrstreifenwechsel notwendig ist.²⁷

²⁷ Zur Verringerung von Lernerfahrungen wurden in der Eingewöhnungsfahrt jedoch beide Szenarien (Spurwechsel erforderlich: ja vs. nein) erlebt.

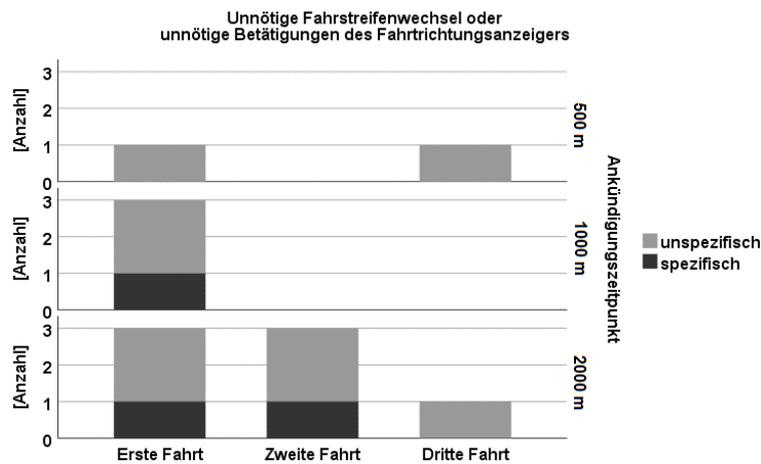


Abbildung 39: Häufigkeit unnötig durchgeführter Fahrstreifenwechsel oder Blinkerbetätigungen in Situationen, die keinen Fahrstreifenwechsel erfordern.

3.2.3.2.5 Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Aufgabe

Der Zeitpunkt der Wiederaufnahme kann in allen Fällen, in denen die Aufgabe abgebrochen wurde und dadurch nicht mehr zur Wiederaufnahme zur Verfügung stand (siehe Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe), nicht bestimmt werden. Weiterhin werden Fälle ausgeschlossen, in denen Fahrer die Aufgabe nicht wieder aufnahmen, weil sie fälschlicherweise der Auffassung waren, nach der manuellen Fahrt durch den Versuchsleiter befragt zu werden. Insgesamt betrifft dies 11 Fälle (siehe Tabelle 97 im Anhang). Beim Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Tätigkeit ergeben sich keine signifikanten Unterschiede, die auf den Zeitpunkt der Ankündigung oder die Spezifität zurückzuführen sind (siehe Tabelle 39). Mehr Zeit für die Vorbereitung des Aufgabenwechsels und ein früheres Pausieren der Aufgabe bei den Zeitpunkten 1000 m oder 2000 m führen im vorliegenden Fall nicht dazu, dass die Aufgabe schneller wiederaufgenommen wird. Unterschiede lassen sich vor allem auf die Situationsgestaltung zurückführen: Wenn vor der Reaktivierung des Systems noch ein Spurwechsel zur Ausgangsspur durchgeführt werden muss, wird die Aufgabe später wiederaufgenommen (siehe Abbildung 40).

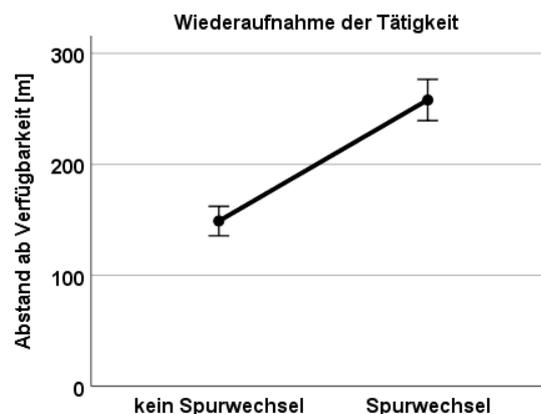


Abbildung 40: Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Aufgabe ab Verfügbarkeit der Automation, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 39: ANOVA Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Aufgabe ab Verfügbarkeit der Automation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	0.29	2	14	.752	0.04
Spezifität	0.00	1	15	.960	0.00
Spurwechsel	132.99	1	15	<.001	0.90
Zeitpunkt * Spezifität	1.43	2	14	.272	0.17
Zeitpunkt * Spurwechsel	0.04	2	14	.960	0.01
Spezifität * Spurwechsel	2.04	1	15	.174	0.12
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.78	2	14	.478	0.10

3.2.3.2.6 Qualitätsaspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

In den untersuchten Maßen der Übernahmequalität „maximale Längsverzögerung“ (siehe Tabelle 40) und „maximale Querb beschleunigung“ (siehe Tabelle 41) zeigen sich keine signifikanten Effekte der Experimentalfaktoren.

Tabelle 40: ANOVA maximale Längsverzögerung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	0.64	2	21	.539	0.06
Spezifität	1.40	1	22	.250	0.06
Spurwechsel	0.61	1	22	.443	0.03
Zeitpunkt * Spezifität	1.85	2	21	.182	0.15
Zeitpunkt * Spurwechsel	2.01	2	21	.159	0.16
Spezifität * Spurwechsel	4.23	1	22	.052	0.16
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.18	2	21	.833	0.02

Tabelle 41: ANOVA maximale Querb beschleunigung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	0.96	2	21	.398	0.08
Spezifität	1.59	1	22	.220	0.07
Spurwechsel	3.57	1	22	.072	0.14
Zeitpunkt * Spezifität	0.56	2	21	.582	0.05
Zeitpunkt * Spurwechsel	1.78	2	21	.194	0.15
Spezifität * Spurwechsel	1.90	1	22	.182	0.08
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.26	2	21	.776	0.02

3.2.3.2.7 Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit

Anzahl eingegebener Wörter: Abbildung 41 stellt die nach der Ankündigung bis zur Übernahme noch eingegebenen Wörter dar. Neben den beiden fehlenden Situationen war in einer Situation aufgrund eines Videofehlers keine Nachkodierung möglich. Wie auf deskriptiver Ebene erkennbar, scheint die Anzahl der geschriebenen Wörter vom Zeitpunkt der Ankündigung abhängig zu sein. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass in den längeren Ankündigungszeitpunkten aufgrund der unterschiedlichen Satzlängen auch mehr Wörter geschrieben werden konnten. In der 500 m-Bedingung werden kaum noch Wörter eingegeben, in der 1000 m-Bedingung werden im Mittel ein bis zwei Wörter getippt, während in der 2000 m-Bedingung im Mittel noch ca. acht Wörter eingegeben werden, bevor sich die Fahrer der Fahraufgabe zuwenden. Auch die Fallzahlen, wie häufig überhaupt noch weitergeschrieben wird, unterscheiden sich deskriptiv: In der 500 m-Bedingung wurde in 19 (von 97) Fällen, in der 1000

m-Bedingung in 76 (von 100) Fällen sowie in 99 (von 100) Fällen in der 2000 m-Bedingung weitergeschrieben.²⁸

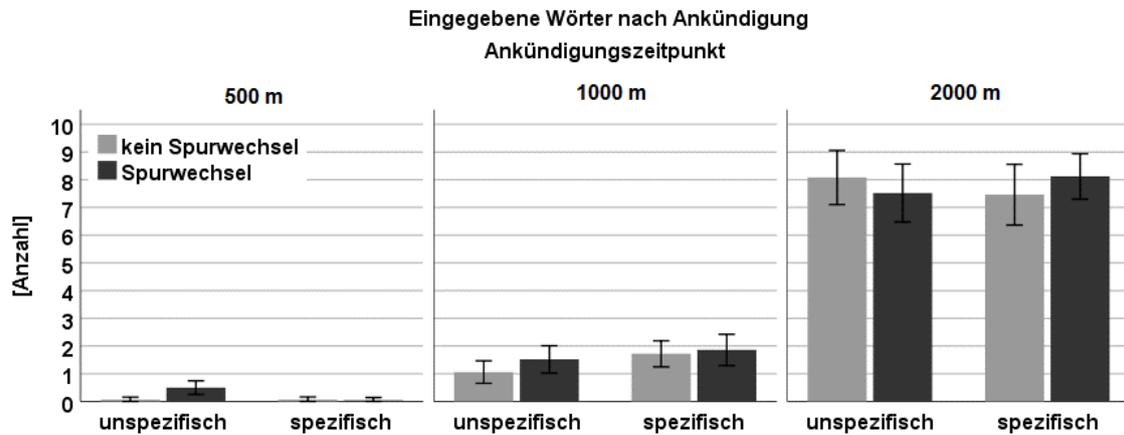


Abbildung 41: Eingegebene Wörter nach Ankündigungsausgabe, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Korrekturrate: Die Aufgabenleistung wurde aufgrund der unterschiedlichen und geringen Fallzahlen nur für die Zeitpunktbedingungen betrachtet (in der 500 m-Bedingung wird nach der Ankündigung nur in 19 von 97 Fällen weitergeschrieben). Es zeigt sich deskriptiv eine höhere Korrekturrate in der 500 m-Bedingung verglichen mit den anderen Bedingungen (siehe Abbildung 42).

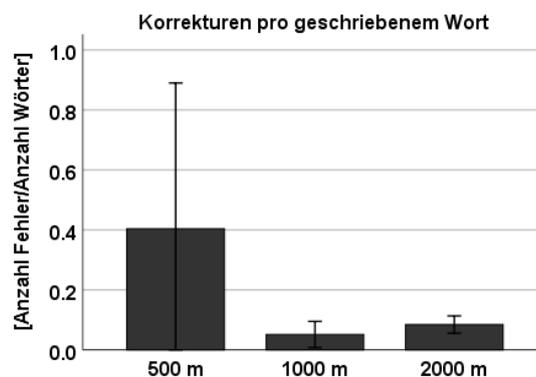


Abbildung 42: Korrekturrate für die Zeitpunktbedingungen, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

3.2.3.2.8 Blickverhalten

Die Blicke der Fahrer sollten über ein kamerabasiertes Blickerfassungssystem aufgezeichnet werden. Aufgrund nicht ausreichender Qualität der Datenaufzeichnung wurden die Blickdaten

²⁸ Eine nicht beabsichtigte zeitliche Verzögerung in allen Bedingungen beim „Wiederanlaufen“ der Aufgabe nach der Überblendung durch die Ankündigung, aufgrund derer die Probanden nicht sofort weiterschreiben konnten, könnte dazu geführt haben, dass die Fahrer in der 500 m- Bedingung kaum noch Wörter schrieben. Im Kapitel zum Blickverhalten (Kapitel 3.2.3.2.8) wird deutlich, dass nach der Ankündigung häufig eine erneute Blickzuwendung zur fahrfremden Tätigkeit erfolgte, die auf eine Bereitschaft zur Weiterbearbeitung schließen lässt.

manuell nachkodiert. In insgesamt 48 von 298 möglichen Fällen konnte das Blickverhalten wegen fehlender oder ungenügender Videodaten nicht nachkodiert werden.²⁹

Abbildung 43 zeigt den **Blickverlauf** für die unterschiedlichen Ankündigungszeitpunkte. Kontrollblicke auf die Fahrsituation (Windschutzscheibe und Spiegel) sowie Blicke auf das Kombi-Instrument werden in der folgenden Analyse zusammengefasst und den Blicken auf das Tablet gegenübergestellt, die auf eine Beschäftigung mit der fahrfremden Tätigkeit schließen lassen. Im Moment der Ankündigung befindet sich der Blick in den meisten Fällen erwartungsgemäß auf dem Tablet. Nach der Ankündigung zeigt sich zunächst eine Blickabwendung von der Nebenaufgabe zur Fahrbahn oder dem Kombi-Display, gefolgt von einer erneuten Zuwendung zur fahrfremden Tätigkeit in allen Bedingungen. In der 1000 m- und 2000 m-Bedingung findet die erneute Zuwendung zur Fahraufgabe zu einem Zeitpunkt statt, zu dem die Fahrer der 500 m-Bedingung noch keine Ankündigung erhalten haben. Dabei wird auch das Ergebnis der Fallzahlen, wie häufig nach der Ankündigung in den verschiedenen Bedingungen noch weitergeschrieben wird, sichtbar (in der 2000 m-Bedingung fast in jedem Fall, in der 1000 m-Bedingung etwa in 75% der Fälle). Der Prozentsatz der Blicke weg von der fahrfremden Tätigkeit steigt ab ca. 1000 m vor der Systemgrenze kontinuierlich an, wobei sich die Kurven der beiden früheren Bedingungen stark überlagern. Bei der Blickverteilung der 500 m-Bedingung spiegelt sich die spätere Zuwendung zur Fahraufgabe wider. Der Großteil der Blicke direkt nach der Ankündigung ist auch hier auf die fahrfremde Tätigkeit gerichtet. Die Fahrer der 500 m-Bedingung erreichen eine vollständige Zuwendung zur Fahraufgabe deskriptiv erst nach den anderen Bedingungen, wobei der Anstieg der Kurve steiler ist.

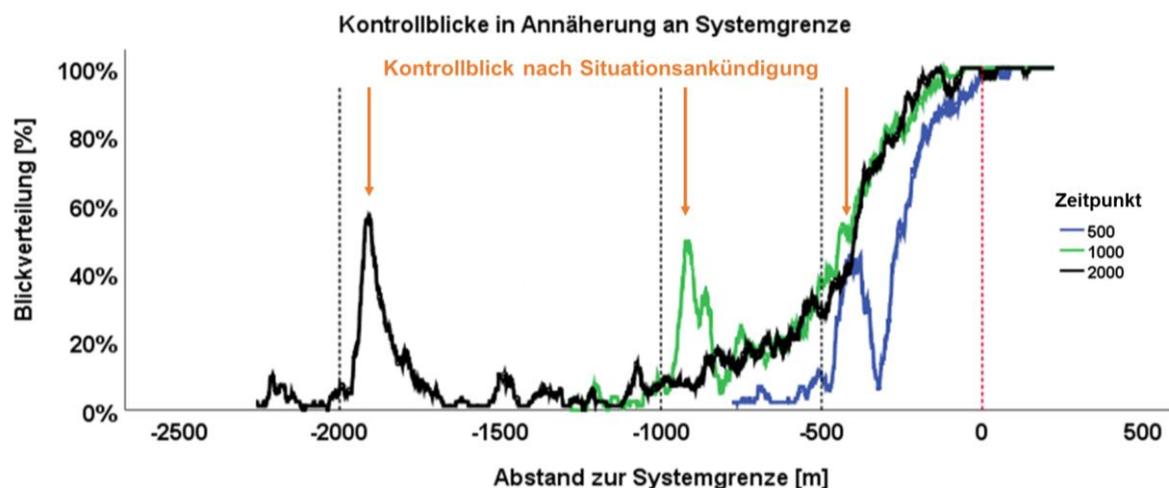


Abbildung 43: Blickverteilung in Annäherung an die Systemgrenze. Blicke zur Fahrbahn (Windschutzscheibe, Spiegel) und auf das Kombi-Instrument sind zu Kontrollblicken zusammengefasst.

²⁹ Die Gesamtzahl der Fälle ergibt sich aus (25 Fahrer x 3 Fahrten x 4 Situationen) abzüglich der zwei fehlenden Situationen.

Für die letzten 500 Meter vor Erreichen der Systemgrenze plus 225 Meter bis zum Erreichen der Baustellenversperrung wird zusätzlich der mittlere **prozentuale Anteil der Kontrollblicke** auf die Fahrsituation (Windschutzscheibe und Spiegel) verglichen (siehe Abbildung 44, vgl. Studie 1). Aufgrund der berichteten fehlenden Werte gehen in die inferenzstatistische Analyse nur 14 vollständige Datensätze ein. Die Ergebnisse der ANOVA finden sich in Tabelle 42. Der Haupteffekt des Anzeigezeitpunkts ist statistisch signifikant, jedoch findet sich ebenfalls eine Dreifachinteraktion.

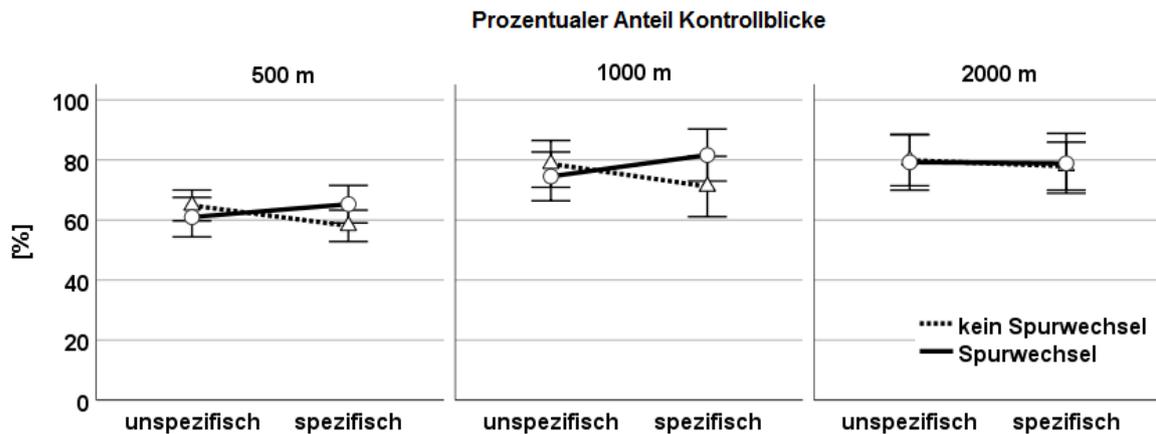


Abbildung 44: Prozentualer Anteil an Kontrollblicken, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 42: ANOVA prozentualer Anteil an Kontrollblicken.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	8.54	2	12	.005	0.59
Spezifität	0.49	1	13	.495	0.04
Spurwechsel	2.40	1	13	.145	0.16
Zeitpunkt * Spezifität	0.07	2	12	.932	0.01
Zeitpunkt * Spurwechsel	0.48	2	12	.632	0.07
Spezifität * Spurwechsel	7.68	1	13	.016	0.37
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	6.30	2	12	.013	0.51

Nachtests zur Interpretation der Dreifachinteraktion (d. h. zweifaktorielle ANOVAs mit den Faktoren Zeitpunkt und Spezifität) getrennt nach Spurwechselbedingung sind in Tabelle 43 und Tabelle 44 zu finden. Ist kein Fahrstreifenwechsel notwendig, ist der Anteil an Kontrollblicken bei Probanden der unspezifischen Ankündigung größer als bei spezifischer Ankündigung (Haupteffekt Spezifität, siehe Abbildung 45). Ist ein Fahrstreifenwechsel notwendig, findet sich kein signifikanter Einfluss der Spezifität. In beiden Spurwechselbedingungen findet sich ein Haupteffekt des Zeitpunkts der Ankündigung. Zur Interpretation des Zeitpunkts-Effekts in den beiden Spurwechselbedingungen finden sich geplante Kontraste zwischen den Zeitpunkten getrennt nach Spurwechselbedingung in Tabelle 45 und Tabelle 46. Hieraus wird ersichtlich, dass die Fahrer der 500 m-Bedingung in beiden Spurwechselbedingungen zu einem geringeren Anteil auf die Fahrsituation blicken als die Fahrer der 1000 m- und 2000 m-Bedingung. Die beiden frühen Ankündigungszeitpunkte unterscheiden sich hingegen nicht signifikant voneinander.

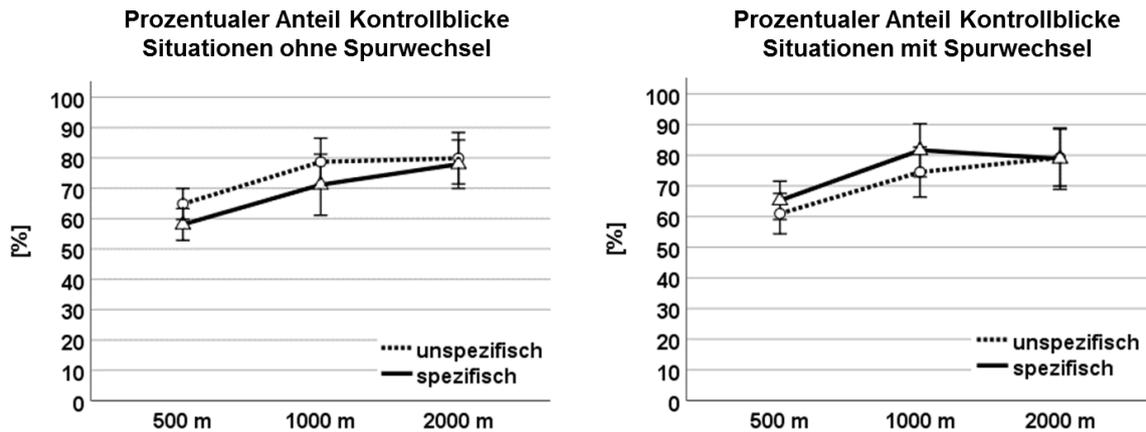


Abbildung 45: Prozentualer Anteil an Kontrollblicken, getrennt nach Spurwechselbedingung, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 43: Nachtest-ANOVA prozentualer Anteil an Kontrollblicken, Bedingung ohne Spurwechsel. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	11.22	2	12	.002	0.65
Spezifität	7.74	1	13	.016	0.37
Zeitpunkt * Spezifität	2.00	2	12	.178	0.25

Tabelle 44: Nachtest-ANOVA prozentualer Anteil an Kontrollblicken, Bedingung mit Spurwechsel. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	7.19	2	12	.009	0.55
Spezifität	2.90	1	13	.113	0.18
Zeitpunkt * Spezifität	1.66	2	12	.232	0.22

Tabelle 45: Kontraste prozentualer Anteil an Kontrollblicken zwischen den Ankündigungszeitpunkten in Bedingung ohne Spurwechsel. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	11.42	1	13	.005	0.47
500 vs. 2000	24.21	1	13	<.001	0.65
1000 vs. 2000	2.03	1	13	.178	.135

Tabelle 46: Kontraste prozentualer Anteil an Kontrollblicken zwischen den Ankündigungszeitpunkten in Bedingung mit Spurwechsel. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
500 vs. 1000	15.43	1	13	.002	0.54
500 vs. 2000	12.04	1	13	.004	0.48
1000 vs. 2000	0.28	1	13	.602	0.02

3.2.3.2.9 Selbstberichte

In Bezug auf die **Nützlichkeit** wird die Situationsankündigung im Mittel als stark „hilfreich“ empfunden (M = 10.10, SD = 2.85, siehe Tabelle 47). Weder der Ankündigungszeitpunkt, die Spezifität oder die Notwendigkeit zum Spurwechsel haben einen statistisch signifikanten Einfluss darauf, wie hilfreich die Ankündigung eingeschätzt wird.

Tabelle 47: ANOVA Nützlichkeit.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	1.71	2	20	.206	0.15
Spezifität	3.86	1	21	.063	0.16
Spurwechsel	0.07	1	21	.798	0.00
Zeitpunkt * Spezifität	1.67	2	20	.214	0.14
Zeitpunkt * Spurwechsel	0.40	2	20	.674	0.04
Spezifität * Spurwechsel	0.51	1	21	.482	0.02
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	1.21	2	20	.318	0.11

In Bezug auf die **Angemessenheit des Zeitpunkts** der Ankündigungen ist nur der Haupteffekt des Zeitpunkts statistisch signifikant (siehe Tabelle 48). Während die 500 m-Bedingung als etwas zu spät und die 2000 m-Bedingung als etwas zu früh erlebt wird, sind die Werte der 1000 m-Bedingung am nächsten im Bereich „genau richtig“ verortet (siehe Abbildung 46).

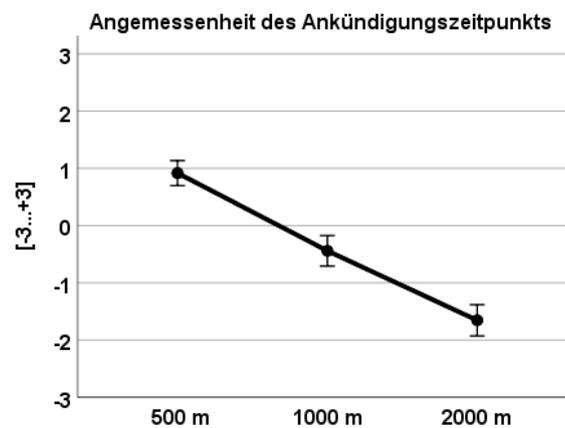


Abbildung 46: Angemessenheit des Ankündigungszeitpunkts („Wie bewerten Sie den Zeitpunkt der Ankündigung?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 48: ANOVA Angemessenheit des Ankündigungszeitpunkts.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	85.59	2	19	<.001	0.90
Spezifität	0.10	1	20	.762	0.01
Spurwechsel	0.08	1	20	.775	0.00
Zeitpunkt * Spezifität	0.84	2	19	.447	0.08
Zeitpunkt * Spurwechsel	3.07	2	19	.070	0.24
Spezifität * Spurwechsel	0.39	1	20	.542	0.02
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.06	2	19	.938	0.01

Die Inferenzstatistik zur selbstberichteten **Situationskritikalität** findet sich in Tabelle 49. Es zeigen sich signifikante Haupteffekte des Zeitpunkts, der Spezifität und der Notwendigkeit des Fahrstreifenwechsels. Die Situationen werden in der 500 m-Bedingung kritischer erlebt als in der 1000 m und 2000 m-Bedingung (siehe Abbildung 47, links). Weiterhin berichten die Probanden bei spezifischen Ankündigungen eine geringere Kritikalität (siehe Abbildung 47, Mitte). Auch in Situationen, in denen ein Fahrstreifenwechsel notwendig ist, wird die Situationskritikalität höher eingeschätzt als in Situationen ohne Notwendigkeit eines Fahrstreifenwechsels (siehe Abbildung 47, rechts). Unabhängig von der Experimentalbedingung liegen die Bewertungen im Mittel im Bereich „harmlos“ (M = 2.14, SD = 1.37).

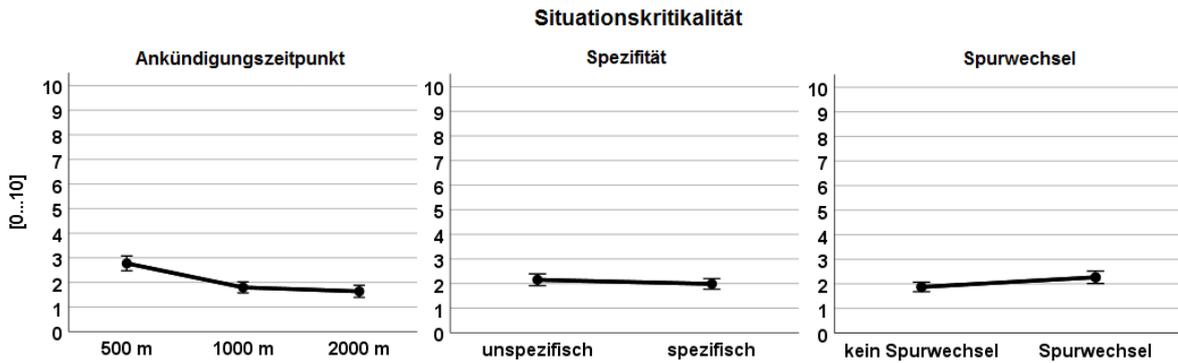


Abbildung 47: Situationskritikalität („Wie bewerten Sie die Situation?“); Effekt Ankündigungszeitpunkt (links), Spezifität (Mitte), Spurwechsel (rechts); Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 49: ANOVA Situationskritikalität.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Zeitpunkt	14.65	2	20	<.001	0.59
Spezifität	6.24	1	21	.021	0.23
Spurwechsel	7.66	1	21	.012	0.27
Zeitpunkt * Spezifität	0.42	2	20	.666	0.04
Zeitpunkt * Spurwechsel	0.67	2	20	.524	0.06
Spezifität * Spurwechsel	0.12	1	21	.728	0.01
Zeitpunkt * Spezifität * Spurwechsel	0.03	2	20	.974	0.00

Die Mehrheit der Fahrer bevorzugt es, 1000 m vor der Systemgrenze über die bevorstehende Übernahme informiert zu werden (siehe Abbildung 48, links). Weiterhin bevorzugen die Fahrer eine spezifische Vorinformation über die Systemgrenze (Abbildung 48, rechts).

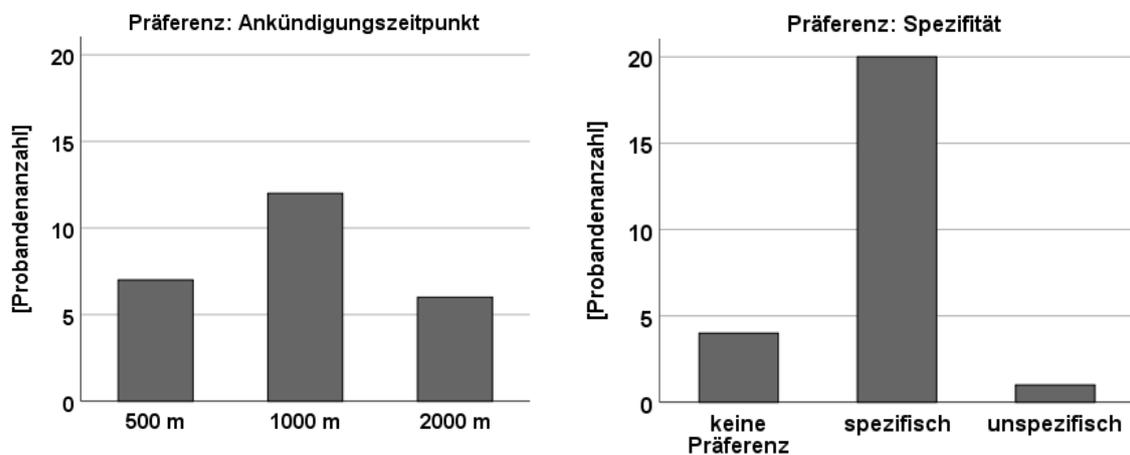


Abbildung 48: Subjektive Präferenzangaben hinsichtlich des Zeitpunkts (links) und der Spezifität (rechts).

3.2.3.3 Studienteil B: Fehlerfall

Zuletzt wird die Fehlersituation, in der keine Ankündigung ausgegeben wurde, analysiert. Dabei war von Interesse, ob die Probanden bei Ausbleiben der Situationsankündigung noch adäquat auf eine plötzliche Übernahmeaufforderung reagieren würden und ob die Zeitpunktbedingung einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Da sich die Fehlersituation am Ende der dritten Fahrt ereignete, die sich aufgrund der verschiedenen Permutationen im Zeitpunkt der vorher erlebten

Ankündigungen unterschied, wird die Situation im between-Design ausgewertet. Für die Auswertung konnten zwei Probanden, bei denen die Fehlersituation aufgrund technischer Probleme mit der Situationsabfolge nicht zu Stande kam, nicht berücksichtigt werden. Ebenso nicht berücksichtigt wurde ein Fahrer, der laut Selbstaussage die Situation schon vor Ausgabe der Übernahmeaufforderung bemerkte. Tabelle 50 stellt die Ergebnisse deskriptiv und inferenzstatistisch dar. Alle Probanden reagieren zunächst damit, die Hände ans Lenkrad zu nehmen (ca. 60 Meter nach der Ausgabe der Übernahmeaufforderung) und das System zu deaktivieren (ca. 90 Meter nach der Ausgabe der Übernahmeaufforderung). Alle bis auf zwei Fahrer, die in den Stillstand bremsen, führen einen Fahrstreifenwechsel aus. Keiner der Probanden produziert eine Kollision oder ein Fahrbahnabkommen. Trotzdem schätzen die Fahrer selbst die Situation als „gefährlich“ ein. Die maximale Längsverzögerung und Querschleunigung liegen in einem leicht erhöhten, jedoch von einem kritischen Bereich noch weit entfernten Bereich (Dingus et al., 2006).³⁰ Die Zeitpunktbedingung hat keinen statistisch signifikanten Effekt auf die abhängigen Variablen in der Fehlersituation.

Tabelle 50: Deskriptive Ergebnisse und ANOVAs mit between-subjects-Faktor „Zeitpunkt der Ankündigung“ in Fehlersituation.

Variable	M	SD	F	Effekt Zeitpunkt			
				df ₁	df ₂	p	η ²
Situationskritikalität	7.55	1.82	1.28	2	19	.301	0.12
Zeitpunkt der Handerkennung	58.98	16.26	0.05	2	19	.952	0.01
Deaktivierungszeitpunkt	89.28	20.27	0.16	2	19	.853	0.02
Manöverzeitpunkt	173.72	12.06	1.07	2	17	.365	0.11
Maximale Längsverzögerung	-2.89	2.66	0.10	2	19	.909	0.01
Maximale Querschleunigung	1.74	0.91	0.32	2	19	.729	0.03

3.2.4 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach Studienteil A (= reguläre Fahrt mit korrekter Ankündigung der Übernahme-situation) und Studienteil B (= plötzliche Übernahmeaufforderung bei ausbleibender Ankündigung) zusammengefasst und diskutiert.

3.2.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)

Im Mittelpunkt der zweiten Studie stand die experimentelle Untersuchung von zeitlichen und inhaltlichen Gestaltungsmerkmalen frühzeitiger Ankündigungen von Übernahme-situationen beim hochautomatisierten Fahren, welche die Vorbereitung des Aufgabenwechsels zur manuellen Fahraufgabe erleichtern sollten. Die Fahrer erlebten drei unterschiedliche

³⁰ Nach der Definition in der 100-Car Study sind laterale Beschleunigungen größer als 0.4 g (~3.92 m/s²) und longitudinale Verzögerungen größer als 0.5 g (~4.91 m/s²) als potentiell kritisch anzusehen.

Ankündigungszeitpunkte in verschiedenen Fahrten, in denen sie mit jeweils vier Übernahme-situationen konfrontiert wurden, die entweder einen Spurwechsel erforderten oder nicht. Die Ankündigungen enthielten entweder Informationen über das notwendige Fahrmanöver oder nicht. Zur Beurteilung der Wirksamkeit wurden neben dem Übernahme- und Blickverhalten das taktische Verhalten im Umgang mit einer fahrfremden Tätigkeit sowie subjektive Urteile herangezogen. Die Neuartigkeit der Studie besteht in Bezug auf die Gestaltung von Übernahmekonzepten vor allem darin, die Komplexität der Übernahme-situation in die Untersuchung der Effekte des Zeitpunkts und der Spezifität mit einzubeziehen. In der bestehenden Literatur werden diese Aspekte meist nur isoliert betrachtet.

Die Variation des **Zeitpunkts der Ankündigung** hatte einen deutlichen Effekt auf das Übernahmeverhalten. In der 500 m-Bedingung zeigte sich eine spätere Pausierung der fahrfremden Tätigkeit sowie eine spätere Deaktivierung des automatisierten Modus verglichen mit den früheren Ankündigungszeitpunkten. Die Blickdatenanalyse offenbarte, dass der Großteil der Blicke nach der Ankündigung in allen Bedingungen zunächst erneut auf die fahrfremde Tätigkeit gerichtet war, bevor der Anteil an Blicken auf das Fahrgeschehen in der Annäherung an die Systemgrenze kontinuierlich anstieg. Beim größten Ankündigungszeitpunkt (2000 m) wendeten sich die Fahrer für den insgesamt längsten Zeitraum nochmal der fahrfremden Tätigkeit zu und bearbeiteten diese in etwa bis zum gleichen Abstand zur Systemgrenze weiter wie die Fahrer der 1000 m-Bedingung. In der 1000 m-Bedingung wendeten sich die Probanden zügig der Fahraufgabe zu, ohne die Aufgabe abrupt zu unterbrechen. Zum selben Zeitpunkt, zu dem in den frühen Ankündigungsbedingungen bereits ein Großteil der Blicke dem Fahrgeschehen zugewandt war, widmeten sich die Fahrer der 500 m-Bedingung nach der Ankündigung nochmal der fahrfremden Tätigkeit und erreichten infolgedessen deskriptiv später eine vollständige Blickzuwendung zur Fahraufgabe. Außerdem tätigten die Fahrer der 500 m-Bedingung zu einem signifikant geringeren Anteil Kontrollblicke auf das Fahrgeschehen als die Fahrer der früheren Zeitpunktbedingungen, während sich diese (1000 m und 2000 m) nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit war im Zeitraum nach der Ankündigung in der 500 m-Bedingung mit einer deskriptiv höheren Korrekturrate im Vergleich zu den anderen Bedingungen verbunden. Die Ergebnisse der subjektiven Befragung legen nahe, dass Fahrer es bevorzugen, bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h 1000 Meter vor Erreichen der Systemgrenze über die bevorstehende Übernahme informiert zu werden. Eine Notwendigkeit, den Fahrer noch früher (d. h. bei 2000 m) zu informieren, scheint hingegen nicht zu bestehen. Die Ankündigung bei 2000 Meter wurde eher als „zu früh“ bewertet. Außerdem kam es in dieser Bedingung auf deskriptiver Ebene gehäuft zu unnötigen Spurwechseln.

Während die Spezifität der Vorinformation den Zeitpunkt der Pausierung, die Handerkennung am Lenkrad oder die Deaktivierung nicht signifikant beeinflusste, zeigte sich ein positiver Effekt der

Spezifität auf den Manöverzeitpunkt. Die Fahrer führten einen erforderlichen Fahrstreifenwechsel unabhängig vom Zeitpunkt früher aus, wenn ihnen die Notwendigkeit dazu im HMI angezeigt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vorankündigung in Situationen, die ein komplexes Fahrmanöver erfordern, für die Übernahmeleistung alleine noch keinen Vorteil bringt, wenn die Erfordernisse der Situation aufgrund eingeschränkter Sichtbarkeit nicht frühzeitig aus der Situation abgeleitet werden können und nicht durch das HMI transportiert werden.³¹ Außerdem gab es eine Wechselwirkung aus Spezifität und Zeitpunkt. Bei spezifischen Vorankündigungen initiierten die Probanden die Fahrstreifenwechsel in der 1000 m-Bedingung früher als in der 500 m-Bedingung, während sich in der unspezifischen Bedingung keine signifikanten Effekte des Zeitpunkts fanden. Ein Effekt auf das Blickverhalten wurde insofern beobachtet, als in den letzten 500 m vor der Systemgrenze zu einem größeren Anteil Blicke auf das Fahrgeschehen gerichtet waren, wenn kein Fahrstreifenwechsel erforderlich war und die Ankündigungen unspezifisch waren. Auf der subjektiven Ebene wurden spezifische Informationen über das auszuführende Fahrmanöver bevorzugt. Als ungünstig erwies sich die Tatsache, dass in einigen Fällen trotz spezifischem Hinweis, dass kein Fahrmanöver notwendig war, Spurwechsel durchgeführt wurden.

3.2.4.2 Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt)

Der positive Effekt frühzeitiger Übernahmeaufforderungen bzw. Ankündigungen auf das Übernahmeverhalten konnte in dieser Studie repliziert werden (Lapoehn et al., 2016; Pampel et al., 2019; van der Heiden et al., 2017). Die Studienergebnisse legen nahe, dass Fahrer zur Vorbereitung des Aufgabenwechsels eine gewisse Zeit benötigen (siehe auch Vlakveld et al., 2018), und grenzen das Zeitfenster für Vorinformationen über bevorstehende Systemgrenzen weiter ein (Lapoehn et al., 2016: 16 Sekunden; van der Heiden et al., 2017: 20 Sekunden; Pampel et al., 2019: 50 Sekunden). Die Befunde können so interpretiert werden, dass ein Abstand zur Systemgrenze von 1000 Metern (entspricht 30 Sekunden bei 120 km/h) für die notwendigen visuell-motorischen und kognitiven Prozesse zur Aufgabenbeendigung und Vorbereitung der Fahraufgabe (Marberger et al., 2017) unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ausreichend ist, während der spätere Ankündigungszeitpunkt (500 m) diese Voraussetzung nicht in gleichem Maße erfüllt. Das zu empfehlende Zeitfenster von ca. 30 Sekunden liegt damit deutlich vor dem in der Literatur typischerweise verwendeten Zeitfenster für dringliche Übernahmeaufforderungen (bspw. Eriksson & Stanton, 2017b). Weiterhin liefern die Ergebnisse erste Hinweise darauf, dass es aus Nutzersicht keinen zusätzlichen Vorteil für die Übernahme bringt, das

³¹ Die Übernahmesituation lag hinter einer Kurve, so dass die Fahrer der unspezifischen Bedingung zur Ableitung des erforderlichen Manövers abwarten mussten, bis die Situation sichtbar war.

Ankündigungszeitfenster beliebig zu vergrößern. Die Probanden zeigten eine Tendenz dazu, die Aufgabe auch in der 2000 m-Bedingung bis zu einem mit der 1000 m-Bedingung vergleichbaren Abstand vor der Systemgrenze weiter zu bearbeiten, obwohl sie die Aufgabe deutlich früher hätten beenden können. Ein Grund dafür, warum die 2000 m-Bedingung subjektiv nicht präferiert wurde, kann darin bestehen, dass durch die längere Notwendigkeit zur Überwachung der Restdistanz bis zur notwendigen Übernahme eine Belastung des Arbeitsgedächtnisses entsteht, was wiederum hinderlich für die Ausführung der fahrfremden Tätigkeit sein kann (Wickens, 2008).³²

Eine Erweiterung der Literatur besteht außerdem darin, dass ergänzend zu den üblichen Parametern der Fahrzeugübernahme (bspw. Deaktivierung der Automation; siehe Zhang et al., 2019) der Wechsel von der fahrfremden Tätigkeit zur Fahraufgabe untersucht wurde. Die frühzeitigen Ankündigungen führten zu einem selbst-initiierten Wechsel von der Ausführung der fahrfremden Tätigkeit zur Fahraufgabe, indem die Fahrer in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Zeitfensters erst die Aufgabe pausierten und sich anschließend der Fahraufgabe zuwendeten. Die Ergebnisse zum Ankündigungszeitpunkt stehen auf dieser Datenebene im Einklang mit Studien aus dem manuellen und automatisierten Fahren, die ebenfalls ein adaptives Verhalten von Fahrern bezüglich ihrer Aufgabenbearbeitung an die Erfordernisse der Verkehrssituation gezeigt haben (Metz, Schömig, & Krüger, 2011; Naujoks et al., 2016; Schömig, Metz, & Krüger, 2011). Der Unterschied zu den zitierten Studien besteht insbesondere darin, dass die Fahrer während des hochautomatisierten Fahrens die Verkehrssituation nicht mehr selbst überwachen müssen, so dass die Informationen, die zur selbstregulierten Anpassung der Involviertheit in fahrfremde Tätigkeiten benötigt werden, durch die Mensch-Maschine-Schnittstelle bereit gestellt werden müssen. Van der Heiden et al. (2017) haben in einer ähnlichen Versuchsanordnung gezeigt, dass generische auditive Vorinformationen Fahrer ebenfalls bei einer frühzeitigeren Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit unterstützen können. Die vorliegende Studie repliziert diese Befunde und erweitert sie auf visuell-auditive Vorankündigungen, die spezifische Informationen über das erforderliche Fahrmanöver beinhalten.

In dieser Studie begannen die Fahrer früher mit der Einleitung eines erforderlichen Fahrmanövers, wenn sie spezifisch informiert wurden. Dies steht im Einklang damit, dass spezifische Formen der Ankündigung den Aufgabenwechsel erleichtern sollten, wenn sie Informationen über die nachfolgend auszuführende Aufgabe beinhalten (Nicholson et al., 2006). Aus theoretischer Sicht kann die frühere Ausführung des Fahrmanövers damit erklärt werden,

³² Zwar war die Aufgabenleistung in der 1000 m und 2000 m-Bedingung deskriptiv vergleichbar, es ist jedoch denkbar, dass die Bearbeitung als anstrengender erlebt wurde. Dies stellt einen möglichen Anknüpfungspunkt für zukünftige Studien dar.

dass die Fahrer weniger kognitive Ressourcen auf den Aufgabenwechsel und die Antizipation notwendiger Handlungsschritte verwenden mussten, da ihnen diese durch die Anzeigen bereits vermittelt wurden. Somit wird der Aufbau von Situationsbewusstsein erleichtert (Vlakveld et al., 2018; Vogelpohl et al., 2019). Dieser Teil der Ergebnisse verdeutlicht das Potential spezifischer Ankündigungen, die Sicherheit von Übernahmesituationen vor allem in komplexen Fahrsituationen zu steigern, in denen die Probanden ansonsten innerhalb kurzer Zeit die Situation analysieren und die Entscheidung zur Ausführung eines Fahrmanövers (beispielsweise eines Fahrstreifenwechsels oder dem Verbleib auf dem ursprünglichen Fahrstreifen) treffen müssen.

Die Ergebnisse unterscheiden sich damit von den bestehenden Erkenntnissen zu Fahrerwarnungen beim manuellen Fahren, die oft keine positiven Ergebnisse von spezifischen Kollisionswarnungen auf das Fahrverhalten finden, zumindest aber subjektive Präferenzen aufzeigen konnten (bspw. Cummings et al., 2007; Naujoks & Neukum, 2014; Thoma et al., 2009). Vereinzelt konnten jedoch auch Vorteile von spezifischen Warnungen auf die Fahrerreaktion in Konfliktsituationen aufgezeigt werden (bspw. Zarife, 2015). Im Kontext von kurzfristigen Übernahmesituationen beim automatisierten Fahren sind die Befunde zur Auswirkung spezifischer Übernahmeaufforderungen bislang ebenfalls heterogen (keine signifikanten Effekte: Petermeijer et al., 2017; positive Effekte: Eriksson et al., 2018; Lorenz et al., 2014). Die visuell-auditive Darbietung der spezifischen Informationen scheint hierbei eine erfolgreichere Strategie darzustellen als die Verwendung abstrakterer Hinweise wie gerichtete Sitzvibrationen (Petermeijer et al., 2017), die erst vom Fahrer dekodiert werden müssen (siehe Arbuthnott & Woodward, 2002; Logan & Schneider, 2006; Miyake, Emerson, Padilla, & Ahn, 2004).

Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Fahrer nach der Übernahme teilweise unnötige Fahrstreifenwechsel ausführten, die auch durch spezifische Ankündigungen, die explizit die Information enthielten, auf der eigenen Fahrspur zu bleiben, nicht vollständig verhindert werden konnten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die notwendige Information zur Ausführung der Fahraufgabe während der manuellen Fahrt nicht ausreichend im Arbeitsgedächtnis der Fahrer repräsentiert war, da die Ausführung der Fahraufgabe mit dem Halten von Informationen im Arbeitsgedächtnis interferiert haben könnte (Altmann & Trafton, 2015; Monk et al., 2008). Eine Möglichkeit zur Verhinderung derartiger Handlungsfehler, die auch von einigen Fahrern selbst als Verbesserungsvorschlag genannt wurde, bestünde in einer Verlängerung der Präsentationszeit des Manöverindikators beispielsweise dadurch, die Informationen über das erforderliche Fahrmanöver auch nach der Systemdeaktivierung anzuzeigen. In der aktuellen Studie wurden die Informationen nicht mehr angezeigt, sobald der Fahrer die Kontrolle übernommen hatte. Die Wegnahme der Anzeige über das notwendige Fahrmanöver nach der Deaktivierung könnte auch einen Einfluss auf die Manöverzeit in den Spurwechselszenarien gehabt haben. Dadurch wurden

die bevorstehenden Situationen möglicherweise als weniger dringlich erlebt, so dass erforderliche Fahrmanöver – vor dem Hintergrund der frühzeitigen Ankündigungszeitpunkte – erst relativ spät durchgeführt wurden. Bevor eine Empfehlung für eine spezifische Spurwechselanzeige gegeben werden sollte, sollten außerdem potentiell negative Auswirkungen wie falsche Handlungsempfehlungen oder falsche Richtungsangaben auf die Fahrsicherheit überprüft werden (Eriksson et al., 2018).

3.2.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)

Um zu untersuchen, ob Erweiterungen des HMIs durch frühzeitige Ankündigungen auch sicherheitskritische Konsequenzen bergen können, wenn diese nicht immer zuverlässig erscheinen, erlebten die Fahrer am Versuchsende eine unvorhersehbare Übernahme-situation mit dringlicher Übernahmeaufforderung ohne zusätzliche Ankündigung. Da die Fahrer zuvor nur Situationen mit Vorankündigungen erlebt hatten, wurde erwartet, dass das Ausbleiben aufgrund des in der vorherigen Fahrt aufgebauten Vertrauens in die Automation (Lee & See, 2004) zu Einschränkungen der Übernahmeleistung führen würde. In der Literatur zu Automationseffekten auf die menschliche Leistungsfähigkeit wird davon ausgegangen, dass die manuelle Korrektur von Automationsfehlern umso schwerer ist, je größer die Leistungsfähigkeit der Automation ist (Onnasch et al., 2014), da eine höhere Leistungsfähigkeit ein stärkeres Automationsvertrauen fördert (Lee & See, 2004). Erwartet wurde deshalb, dass sich die Probanden umso stärker auf die Unterstützung durch Situationsankündigungen verlassen würden, je größer das Präsentationszeitfenster in der vorangegangenen Fahrt war.

Es zeigte sich jedoch kein signifikanter Effekt des (vorherigen) Zeitpunkts der Ankündigung auf die zeitlichen und qualitativen Aspekte des Übernahmeverhaltens. Insgesamt lagen die maximale Längsverzögerung und Querschleunigung in einem leicht erhöhten Bereich. Die Fahrer selbst schätzten die Kritikalität der Situation jedoch als „gefährlich“ ein, während die Übernahme-situationen mit Ankündigung in der regulären Fahrt im Durchschnitt als „harmlos“ bewertet wurden. Zwei Probanden führten keinen Spurwechsel aus, sondern verzögerten vor der Baustelle in den Stillstand. Kollisionen oder Fahrbahnabkommen kamen allerdings nicht vor.

3.2.4.4 Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall)

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei einer längeren gegenüber einer kürzeren Ankündigungszeit nicht mit negativen Übertragungseffekten bei plötzlichen Übernahme-situationen zu rechnen ist. Dass keine signifikanten Effekte des Vorinformationszeitpunkts gefunden wurden, kann darin begründet sein, dass die dringliche Übernahmeaufforderung durch ihren starken Aufforderungscharakter zu einer schnellen Reaktion

führte, und somit keine Varianz zwischen den Bedingungen entstand. Alternativ ist es möglich, dass die Probanden durch den within-Versuchsplan auf einen Wechsel des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets eingestellt waren, und sich potentiell negative Effekte der unterschiedlichen Zeitpunkte auf die Übernahmeleistung somit nicht manifestierten.

Dass die Situation als „gefährlich“ eingeschätzt wurde, obwohl das Zeitfenster mit 6.75 Sekunden bis zum Erreichen der Baustellenversperrung ausreichend sein sollte (mittleres zur Verfügung gestelltes Zeitfenster in Studien mit Übernahmeaufforderungen nach Eriksson & Stanton, 2017b: 6.37 s), weist auf den weiteren Forschungsbedarf zu diesem Aspekt hin. In der ersten Studie wurden ähnliche Übernahme-situationen auch mit einem kleineren Zeitbudget von den Probanden durchschnittlich als „unangenehm“ beurteilt. Ein derartiger Effekt auf das subjektive Erleben von Übernahme-situationen kann zu einer verringerten Akzeptanz von hochautomatisiertem Fahren führen. Auch die Tatsache, dass einige Probanden unnötigerweise vor der Baustelle in den Stillstand bremsen, stellt kein ideales Verhalten in einer Übernahme-situation auf der Autobahn dar (Naujoks, Wiedemann, Schömig, Jarosch, & Gold, 2018). Eine Aufklärung der Probanden über die Möglichkeit, dass die Vorankündigung einer Übernahmeaufforderung nicht immer voranstellen muss, hätte diesen negativen Effekten im Vorfeld entgegenwirken können.

Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass die Studie mit einem Versuchsdesign ohne Kontrollgruppe, die während der regulären Fahr keine Vorinformationen, sondern nur eine dringliche Übernahmeaufforderung erhielt, arbeitete. Um umfassendere Aussagen über die Güte der Reaktion auf eine ausbleibende Ankündigung treffen zu können, hätte es dieser Bedingung bedurft. Die Entscheidung gegen eine weitere Bedingung ist in der Versuchseffizienz begründet, da die Versuchszeit pro Teilnehmer mit 2.5 h bereits sehr hoch angesetzt war. Von dem within-Design sollte aufgrund der Erhebung von Präferenzangaben (d. h. subjektiver Vergleich der Anzeige-konzepte) nicht abgewichen werden. Zukünftige Studien, die diesen Aspekt weiter beleuchten, sollten diese versuchsplanerischen Einschränkungen berücksichtigen und ein anderes experimentelles Vorgehen wählen.

3.2.4.5 Limitationen der Studie und Ausblick

Die Ergebnisse zur spezifischen Variante der Situationsankündigung beschränken sich auf ein Konzept, welches den Grund und den Ort der Systemgrenze sowie das erforderliche Manöver gleichzeitig anzeigt und mit einem Konzept, welches nur die Information über den Grund der Übernahme enthielt, verglichen wurde. Der separate Effekt der Ortsangabe sowie der Manöverempfehlung wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, weswegen keine Erkenntnisse über die Einzelwirkung dieser Informationen auf das Übernahmeverhalten oder die subjektive Präferenz vorliegen.

Neben der konkreten Ausgestaltung der Informationen ist der Präsentationsort der Vorinformation ein limitierender Faktor für die Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Die Ankündigung wurde am selben Ort wie die fahrfremde Tätigkeit dargeboten, um deren Wahrnehmung durch den Fahrer sicherzustellen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Situationen, in denen Fahrer eine Tätigkeit auf einem mobilen Endgerät ausführen, ohne dass die Ankündigungen im zentralen Sichtfeld dargeboten werden, ist daher nicht gewährleistet.

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob die gewählte Präsentationsform der Ankündigung nicht selbst eine Unterbrechung darstellt (siehe Trafton et al., 2003) und somit dem Ziel, negative Auswirkung auf die Bearbeitung der primären Aufgabe durch plötzliche Unterbrechungen zu verhindern (Naujoks, Wiedemann et al., 2017), entgegensteht. Beispielsweise fanden Wintersberger und Riener et al. (2018) eine Einschränkung der Tippleistung von Textnachrichten, wenn diese durch eine Übernahmeaufforderung am Anzeigort der fahrfremden Tätigkeit unterbrochen wurden. Negative Effekte auf die Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit können durch eine lange Anzeigedauer sowie eine hohe Informationsdichte der Ankündigung, welche die eigentliche Unterbrechung ankündigen soll, verstärkt werden (Trafton et al., 2003). Zukünftige Studien sollten untersuchen, inwieweit es möglich ist, die Interferenz von Vorankündigungen mit der während der automatisierten Fahrt ausgeführten Tätigkeit zu minimieren. Beispielsweise könnten intelligente Fahrerüberwachungssysteme durch eine Analyse der vom Fahrer ausgeführten Tätigkeit einen geeigneten Unterbrechungszeitpunkt erkennen und die Ankündigung an Grenzen von Teilaufgaben ausgeben (Bailey & Iqbal, 2008; Monk, Boehm-Davis, Mason et al., 2004). Sogenannte *attention manager*, wie sie beispielsweise von Victor (2005) vorgeschlagen wurden, gehen ebenfalls in diese Richtung. Alternativ könnte die Ankündigung in einer Modalität, die parallel zur Ausführung der fahrfremden Tätigkeit verarbeitet werden kann (bspw. Sprachnachrichten, siehe Forster et al., 2017), dargeboten werden (Latorella, 1998). Aus der angeführten Beschränkung lässt sich ableiten, dass eine Vorinformation über bevorstehende Systemgrenzen, die nicht zwangsläufig selbst eine Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit darstellt, möglicherweise eine komfortablere Lösung darstellt, als die in dieser Studie verwendete Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die letzte Studie greift diesen Ansatz auf und vergleicht eine diskrete event-basierte Anzeige mit einer kontinuierlichen Art der Vorinformation.

Mit der fahrfremden Tätigkeit sollte eine Aufgabe simuliert werden, die von den Teilnehmern jeweils in kleinere Teilaufgaben unterteilt und unterbrochen werden kann (Monk, Boehm-Davis, Mason et al., 2004). Es ist vorstellbar, dass die Ergebnisse nicht auf andere Aufgabenarten generalisierbar sind, welche durch die Probanden weniger gut in Teilaufgaben unterteilbar sind (Czerwinski, Horvitz, & Wilhite, 2004; Turner, Allen, & Whitaker, 2015). Auch die visuell-manuelle Modalität der verwendeten fahrfremden Tätigkeit ist nicht ohne weiteres auf andere

Arten von Tätigkeiten übertragbar. Es ist vorstellbar, dass sowohl auditive Tätigkeiten (z. B. Hörbuch hören), die besser mit der manuellen Fahraufgabe vereinbar sind, als auch Tätigkeiten, die eine stärkere motorische Komponente beinhalten und deswegen schlechter mit der Fahraufgabe vereinbar sind (bspw. durch das in der Hand Halten von Gegenständen; siehe Wandtner et al., 2018a), zu einem anderen Übernahmeverhalten führen.

Auch ein Einfluss des verwendeten Materials der fahrfremden Tätigkeit (d. h. die Beschaffenheit der Sätze) auf den Zeitpunkt der Aufgabenunterbrechung ist denkbar. Um die Anforderungen an die Sätze in allen Zeitpunktbedingungen gewährleisten zu können (siehe Kapitel 3.2.2.5 zur fahrfremden Tätigkeit), mussten diese zum Teil aus verschiedenen Teilsätzen zusammengesetzt werden (dies gilt vor allem für die 2000 m-Bedingung). Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass zur Unterbrechung der Aufgabe das Ende eines Teilsatzes gewählt wurde, da dieses möglicherweise stärker als natürlicher Unterbrechungspunkt (*natural breakpoints*; Janssen et al., 2012) gesehen wurde als das Beenden von Wörtern. Zukünftige Studien sollten diese Unterschiede in dem verwendeten Material kontrollieren. Auch die Menge des geschriebenen Textes vor der Übernahme, die sich in Abhängigkeit des Ankündigungszeitpunkts unterschied, könnte den Zeitpunkt der Aufgabenunterbrechung beeinflusst haben. Möglicherweise wurde bei den früheren Zeitpunkten eine größere kognitive Beanspruchung erzeugt, die zu einer früheren Unterbrechung der Aufgabe führte. Dass sich die beiden frühen Ankündigungszeitpunkte (1000 m bzw. 2000 m) im Pausierungszeitpunkt nicht signifikant unterschieden, spricht allerdings gegen diese Annahme.

Bezüglich der Leistung in der fahrfremden Tätigkeit muss einschränkend erwähnt werden, dass die Erhebung bestimmter leistungsbezogener Maße mit der vorhandenen Aufgabenumsetzung nicht möglich war. So war die Messung der Tippgeschwindigkeit (bspw. Eingaben pro Zeiteinheit, siehe bspw. Wintersberger, Riemer et al., 2018) zur Untersuchung, ob Fahrer bei geringerer zur Verfügung stehender Zeit in Annäherung an Systemgrenzen die Aufgabe schneller bearbeiten, um eine Aufgabe noch vor Erreichen der Systemgrenze zu beenden, nicht möglich. Hierfür wäre eine Loslösung des gewählten Aufgabensettings mit zeitlich getakteten Aufgaben erforderlich gewesen. Die Messung leistungsbezogener Aspekte sollte in künftigen Studien umfassender möglich sein.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Übernahmezeitpunkt in dieser Studie durch die Instruktion beeinflusst sein kann. Zum einen wurden die Fahrer instruiert, die Fahrzeugkontrolle komfortabel zu übernehmen. Außerdem erfolgte ein Punktabzug und Aufgabenabbruch, wenn die Aufgabe nicht vor der Ausgabe einer dringlichen Übernahmeaufforderung oder mitten im Wort unterbrochen wurde. Diese Regel hatte zum Ziel, negative Konsequenzen einer abrupten Unterbrechung von fahrfremden Tätigkeiten zu simulieren, wie sie in der Realität beispielsweise bei einem Telefonat, was plötzlich beendet werden muss, auftreten können. Hinweise, dass Fahrer

Aufgaben ohne diese Regeln länger bearbeiten würden, gibt es beispielsweise in den Studien von Wandtner et al. (2018b) und Wintersberger und Riener et al. (2018). Vor diesem Hintergrund beschränken sich die Ergebnisse möglicherweise auf fahrfremde Tätigkeiten, die mit einer hohen Motivation zur Beendigung vor der Übernahme einhergehen (Janssen & Brumby, 2015).

Weiterhin kann die vorliegende Studie ebenfalls nur eingeschränkt Aussagen zur Wiederaufnahme von Tätigkeiten machen. Das gewählte Design wurde vornehmlich für die Frage, wie lange die Fahrer die Aufgabe vor der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung weiterbearbeiten, entworfen. Durch die Möglichkeit, die vorherige Aufgabenposition anhand des bereits geschriebenen Texts abzulesen, mussten sich die Probanden nicht merken, an welcher Stelle sie den Text nach der Unterbrechung weiterbearbeiten mussten. Dieser Hinweis erleichterte den Fahrern womöglich die Wiederaufnahme (Altmann & Trafton, 2004b). Um die Effekte des Übernahmekonzepts auf die Wiederaufnahme nach der Übernahme zu untersuchen, sollten zukünftige Studien auf ein Aufgabensetting zurückgreifen, welches eine genauere Untersuchung von Aspekten der Wiederaufnahme ermöglicht (siehe bspw. Altmann & Trafton, 2015 für eine Diskussion relevanter Aufgabenmerkmale zur Untersuchung der Wiederaufnahme unterbrochener Tätigkeiten).

3.3 Studie 3: Kontinuierliche Anzeige der Restdistanz im automatisierten Modus

3.3.1 Fragestellung

Die dritte Studie erweitert das Unterstützungskonzept der frühzeitigen Ankündigung von Systemgrenzen um eine Komponente, die den Fahrern die Möglichkeit bietet, die Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten längerfristig zu planen. Während Fahrer in den bisherigen Studien zu festen Zeitpunkten in Annäherung an die Systemgrenze diskrete, sogenannte *ereignis-basierte* Ankündigungen erhielten (d. h. die Ankündigung wurde erst bei Erreichen eines bestimmten Abstands zur Systemgrenze ausgegeben), wurde in dieser Studie die verbleibende Distanz im automatisierten Modus dauerhaft angezeigt (sog. *start-basierte* Vorausschau). Durch diese Information sollte der Fahrer eine bevorstehende Übernahme frühzeitig antizipieren und strategische Entscheidungen bezüglich der zu bearbeitenden Aufgabe treffen können. Je nach verbleibender Distanz im automatisierten Modus kann sich der Nutzer beispielsweise entscheiden, mehr oder weniger komplexe oder unterschiedlich lange fahrfremde Tätigkeiten auszuführen.

Die zentrale Frage der dritten Studie war, ob sich potentielle Vorteile einer kontinuierlichen Anzeige der verbleibenden Distanz im automatisierten Modus gegenüber der bisher untersuchten, ereignis-basierten Situationsankündigung empirisch zeigen würden. Dabei sollte insbesondere untersucht werden, wie sich das Aufgabenbearbeitungsmuster (d. h. welche fahrfremden Aufgaben zu welchem Zeitpunkt während der automatisierten Fahrt ausgewählt werden) zwischen den Bedingungen unterscheidet und welche Auswirkungen sich bei unterschiedlichen Mustern auf das Verhalten in Übernahmesituationen ergeben.

Zur Untersuchung der Fragestellung wurde die fahrfremde Tätigkeit im Vergleich zur zweiten Studie geringfügig verändert. Fahrer sollten in Anlehnung an den Versuchsaufbau von Schömig und Metz (2013) zu bestimmten Zeitpunkten während der Fahrt Textaufgaben unterschiedlicher Länge (kurz, mittel und lang) auswählen. Aufgrund der unterschiedlichen Länge unterschieden sich die Aufgaben auch darin, ob sie rechtzeitig vor der Systemgrenze beendet werden konnten. Nur kurze und mittlere Aufgaben konnten rechtzeitig beendet werden. Die Motivation zur Aufgabenbearbeitung wurde durch ein Punktesystem gesteigert (je länger die Aufgabe, desto mehr Punkte konnten erreicht werden), durch das die monetäre Kompensation der Versuchsteilnahme erhöht werden konnte. Falls Aufgaben vor Übernahmesituationen jedoch nicht abgeschlossen wurden, führte dies zu einem Punktabzug.

Erwartet wurde, dass die Fahrer aufgrund einer permanent dargebotenen Distanzinformation je nach verfügbarer Zeit unterschiedlich zeitintensive Aufgaben wählen würden (d. h. während der Fahrt lange, vor der Systemgrenze kurze oder mittlere Aufgaben). Demgegenüber wussten Fahrer der ereignis-basierten Ankündigungsbedingung erst im Moment der Ankündigungspräsentation, wann die nächste Übernahme stattfinden würde. Deswegen wurde davon ausgegangen, dass Fahrer dieser Bedingung aufgrund der Unsicherheit, wann die nächste Übernahme bevorsteht, während der Fahrt häufiger kurze oder mittlere Aufgaben auswählen würden, um die Auswahl von langen Aufgaben zum falschen Zeitpunkt nicht zu riskieren. Falls die Probanden jedoch keine konservative Strategie der Aufgabenauswahl verfolgen, könnte es häufiger zu Fehlentscheidungen bei der Auswahl der letzten Aufgabe vor der Übernahmesituation kommen (d. h. Auswahl von langen Aufgaben, die nicht mehr vor der Übernahme beendet werden können). Neben der Aufgabenauswahl könnte die Art der Vorinformation (start- vs. ereignis-basiert) auch die Qualität der Aufgabebearbeitung beeinflussen. So ist es denkbar, dass Fahrer bei Erhalt einer ereignis-basierten Ankündigung mehr Fehler bei der Aufgabebearbeitung machen, da die Präsentation der Ankündigung eine kurzzeitige Unterbrechung der Aufgabebearbeitung darstellt (Trafton et al., 2003), die bei start-basierter Darbietung nicht gegeben ist.

Weiterhin wurden beim Wechsel von der hochautomatisierten zur manuellen Fahrt auch Auswirkungen auf das Fahrverhalten erwartet. Sollte es in der ereignis-basierten Bedingung zu gehäuften Fehlentscheidungen in der Aufgabenwahl (d. h. Auswahl langer Aufgaben vor der Systemgrenze) kommen, bearbeiten die Fahrer die Aufgabe unter Umständen länger weiter und sind im entscheidenden Zeitfenster weniger aufmerksam als Fahrer, die durch die Wahl der richtigen Aufgabenlänge die Aufgabe bereits beendet haben. Dass Fahrer auch in Übernahmesituationen die Tendenz haben, bereits begonnene fahrfremde Tätigkeiten weiter zu bearbeiten, wurde bereits empirisch gezeigt (Wandtner et al., 2018b). Dadurch bedingt wurde eine spätere Beendigung der Aufgabe, Übernahme der Fahrzeugführung und Manöverausführung als im Vergleich zu start-basierten Konzepten erwartet.

Neben den möglichen Vorteilen einer permanenten Anzeige der Restdistanz ist es denkbar, dass die zusätzliche Teilaufgabe des Überwachens der verbleibenden Distanz (durch notwendige Blickwechsel zwischen Aufgabe und Meteranzeige über einen längeren Zeitraum) im Vergleich zur einer *just-in-time* Präsentation einer Situationsankündigung eine Doppelbelastung des Arbeitsgedächtnisses während der Aufgabebearbeitung darstellt. Die Fahrt mit der Anzeige könnte deswegen als beanspruchender und weniger komfortabel empfunden werden und sich negativ auf die Aufgabebearbeitung auswirken. Eine diskrete Ankündigung hätte unter diesem Aspekt den Vorteil, dass die Fahrer die Verantwortung an das System abgeben können und so lange nichts tun müssen, bis eine Ankündigung ausgegeben wird. Vor diesem Hintergrund wäre

es auch denkbar, dass Fahrer eine Ankündigung über eine bevorstehende Systemgrenze gegenüber der kontinuierlichen Abstandsanzeige bevorzugen.

Eine weitere Fragestellung der Studie war, ob die alleinige Präsentation der kontinuierlichen Distanzanzeige ausreichend ist oder ob zusätzlich eine ereignis-basierte Situationsankündigung dargeboten werden sollte. Im Falle einer Kombination aus Vorausschau und Ankündigung könnten Fahrer die kontinuierliche Anzeige nutzen, wenn sie das möchten, aber sie auch vernachlässigen, da sie durch die Ankündigung rechtzeitig vor der Übernahme informiert werden.

Insgesamt wurden drei Konzepte miteinander verglichen (siehe Abbildung 49): (1) Situationsankündigung ohne kontinuierliche Anzeige der Entfernung bis zur Systemgrenze (*ereignis-basiert*, siehe Studie 1 und 2), (2) kontinuierliche Anzeige der Entfernung bis zur Systemgrenze ohne Situationsankündigung (*start-basiert*) und (3) kontinuierliche Anzeige der Entfernung bis zur Systemgrenze mit zusätzlicher Situationsankündigung (*Kombination*).



Abbildung 49: Übersicht über die verschiedenen Anzeigeconzepte (HAF = hochautomatisiertes Fahren).

Allerdings kann auch bei ereignis-basierten Situationsankündigungen eine strategische Aufgabenbearbeitung erfolgen, wenn deren Informationen von Fahrern in die Aufgabenauswahl einbezogen werden können. Dies ist der Fall, wenn die Information bereits dargeboten wird, bevor Fahrer sich für eine Aufgabe entscheiden. Deshalb erschien die Situationsankündigung in dieser Studie entweder *vor* oder *nach* der Aufgabenauswahl (between-subjects-Bedingung „Ankündigungszeitpunkt“). Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob eine event-basierte Anzeige, die im passenden Moment präsentiert wird, hinsichtlich der strategischen Aufgabenauswahl vergleichbar mit den start-basierten Konzepten ist.

Neben den Effekten der Gestaltung der Vorinformation wurden auch in dieser Studie mögliche Effekte der **Prädiktionsunsicherheit** betrachtet. Da eine Distanzangabe aufgrund der Dynamik

von Verkehrssituationen in Realität mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sein kann, wurde in dieser Studie untersucht, ob systembedingte Falschberechnungen bezüglich der verbleibenden Distanz bis zur nächsten Übernahme sicherheitskritische Auswirkungen auf das Übernahmeverhalten haben und ob diese vom Anzeigekonzept beeinflusst werden. Im vorliegenden Fall wurde die Systemgrenze früher als angekündigt erreicht. Durch die ständige Notwendigkeit, die Distanzangabe der start-basierten Vorausschaubedingung zu überwachen, wurde erwartet, dass die Fahrer dieser Bedingungen bei Erreichen der Situation ein höheres Situationsbewusstsein haben. Dies sollte sich in einem positiven Einfluss auf die Übernahmeleistung zeigen (Parasuraman et al., 2000).

3.3.2 Methodik

3.3.2.1 Versuchsumgebung

Die Studie wurde im dynamischen Fahrsimulator der WIVW GmbH (siehe Studie 1 und 2 für eine Beschreibung) durchgeführt.

3.3.2.2 Versuchsdesign

Der Versuch wurde in einem between-within-Versuchsdesign mit den within-subject-Faktoren „Anzeigekonzept“ und „Länge des Fahrtabschnitts“ sowie dem between-subjects-Faktor „Ankündigungszeitpunkt“ durchgeführt, die im Folgenden näher beschrieben werden.

3.3.2.2.1 Faktor „Anzeigekonzept“

Der within-Faktor „Anzeigekonzept“ wurde in drei Stufen variiert (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50):

- **Ereignis-basierte Ankündigung:** Eine Situationsankündigung wurde bei Unterschreiten eines definierten Abstands zur Systemgrenze ausgegeben, was eine kurzfristige Handlungsvorbereitung auf die nächste Situation ermöglicht (d. h. taktische Entscheidung bezüglich der Aufgabebearbeitung: Entscheidung eine bereits begonnene Aufgabe zu unterbrechen oder weiter zu bearbeiten, siehe Kapitel 2.3.2.1 der Theorie). Der Schreibbereich der Aufgabe wurde durch die Ankündigung überblendet, wenn die Ankündigung vor der Aufgabenauswahl erfolgte. Im Unterschied zu Studie 2 wurde die Überblendungszeit der Aufgabe von 4 auf 1.5 Sekunden verringert und währenddessen auf die Pausierung der Aufgabe verzichtet, um eine Weiterbearbeitung während der Überblendung zu ermöglichen. Auf diese Weise sollte der Unterschied zur start-basierten

Bedingung, bei der es aufgrund der fehlenden Ankündigung keine Überlagerung gab, so gering wie möglich gehalten werden.³³ Mit Ausgabe der Ankündigung wurde der Abstandsbalken im oberen Bereich des Tablets sichtbar. Nach der Überblendung wurde eine verkleinerte Darstellung über dem Schreibbereich angezeigt.

- **Start-basierte Vorausschau:** Kontinuierliche Anzeige der verbleibenden Distanz zur nächsten Systemgrenze, beginnend mit Systemaktivierung, wodurch eine längerfristige Aufgabenplanung ermöglicht werden sollte (d. h. strategische Entscheidungen bezüglich der Aufgabenauswahl: Auswahl einer angemessenen Aufgabenlänge in Abhängigkeit der verbleibenden Distanz mit dem Ziel, die Aufgabe vor der Übernahme zu beenden). Die Distanzangabe wurde numerisch dargestellt (z. B. „7,5 km bis Baustelle“) und zählte während der Annäherung an die Systemgrenze in 0.1 km-Schritten herunter. Ab 1 km zur Systemgrenze wurde die Distanz durch eine Meterangabe angezeigt, die in 100 m-Schritten ablief.
- **Kombination:** Anzeige der verbleibenden Distanz bis zur nächsten Übernahmesituation („start-basierte Vorausschau“) mit zusätzlicher Ankündigung der Situation durch „ereignis-basierte Ankündigung“.

Die Präsentation der Anzeigen erfolgte blockweise, d. h. die Fahrer erlebten jedes Konzept während einer separaten Fahrt.

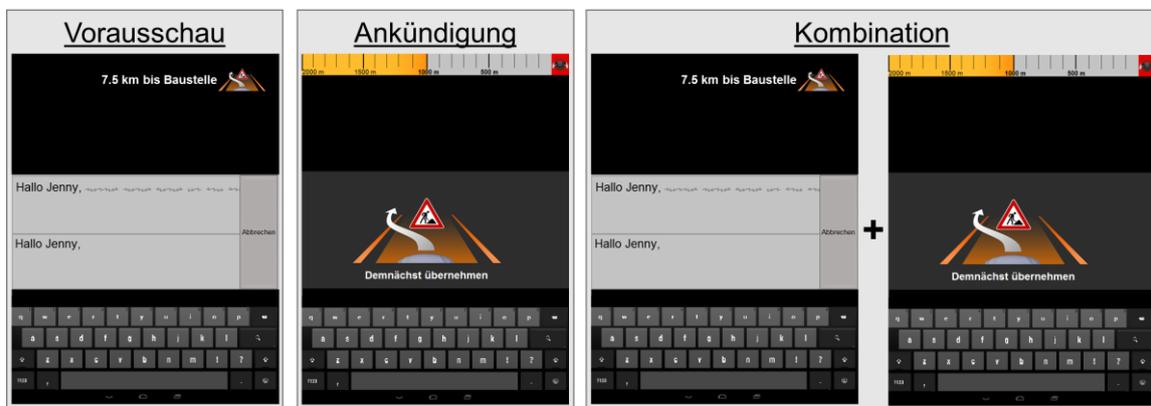


Abbildung 50: Varianten der Anzeigekonzepte; Links: start-basierte Vorausschau; Mitte: ereignis-basierte Ankündigung; Rechts: Kombination.

³³ Damit die Verkürzung der Präsentationszeit keinen Nachteil für die Interpretation des angezeigten Manövers darstellt, wurden die Fahrer vor Studienbeginn darüber informiert, dass alle Übernahmesituationen einen Fahrstreifenwechsel erforderten.

3.3.2.2.2 Faktor „Ankündigungszeitpunkt“

Als between-subjects-Faktor wurde der Zeitpunkt der Situationsankündigung in den Bedingungen, die eine Ankündigung enthielten („Ankündigung“ und „Kombination“) zweistufig variiert. Die Ankündigung erfolgte entweder vor oder nach dem Zeitpunkt, zu dem die Fahrer sich für die Länge der letzten Aufgabe vor einer Übernahme entscheiden mussten, die Auswahl der letzten Aufgaben erfolgte dementsprechend immer beim selben Abstand zur Systemgrenze.

- **Ankündigung nach Aufgabenauswahl:** In dieser Variante wussten die Fahrer zum Zeitpunkt der Aufgabenauswahl noch nicht, dass eine Übernahme bevorstand, und konnten diese Information deshalb nicht in die Auswahl miteinbeziehen. Die Ankündigung erschien 1000 Meter vor der Systemgrenze, was ca. 15 Sekunden nach Erscheinen der Aufgabenauswahl entsprach.
- **Ankündigung vor Aufgabenauswahl:** In dieser Variante konnte die durch die Ankündigung vermittelte Information über den Abstand zur Systemgrenze in die Aufgabenauswahl miteinbezogen werden, so dass strategische Aufgabenentscheidungen auch beim Konzept der ereignis-basierten Ankündigung möglich waren. Die Ankündigung erschien 1666 Meter vor der Systemgrenze, und damit ca. 5 Sekunden vor der Aufgabenauswahl.

3.3.2.2.3 Faktor: „Länge des Fahrtabschnitts“

Während der Fahrt mit einem Anzeigekonzept absolvierten die Probanden je drei Übernahmesituationen. Die Länge des Fahrtabschnitts zwischen den Übernahmesituationen, in denen die Probanden die fahrfremde Tätigkeit bearbeiteten, variierte dreistufig, so dass pro Fahrtabschnitt eine unterschiedliche Anzahl an Aufgaben bearbeitet werden konnte. Dies geschah, um Erwartungseffekte auf eine bevorstehende Übernahme zu minimieren, so dass der Zeitpunkt der nächsten Übernahme nicht aus der Länge des Fahrtabschnitts bzw. der Aufgabenanzahl, die innerhalb eines Abschnitts angeboten wurden, abgeleitet werden können.

- **Kurz:** ca. 7.5 km mit drei Aufgaben
- **Mittel:** ca. 13 km mit fünf Aufgaben
- **Lang:** ca. 18 km mit sieben Aufgaben

3.3.2.2.4 Fehlerfall: Ungenauigkeit der Distanzangabe

Um zu untersuchen, ob frühzeitige Vorinformationen Nachteile im Übernahmeverhalten mit sich bringen, wenn die Entfernungsangabe zur Systemgrenze ungenau prädiert wird, erlebten die Fahrer eine Situation, bei der die Systemgrenze früher als vom HMI angezeigt, erreicht wurde. Die Systemgrenze fand während einer separaten Fahrt nach der letzten Konzeptfahrt statt,

während die Fahrer mit der Bearbeitung der Aufgabe beschäftigt waren. Der Vergleich erfolgte zwischen dem start- mit dem ereignis-basierten Konzept (between-subjects). Im ereignis-basierten Konzept erfolgte die Ankündigung weiterhin je nach between-Bedingung entweder vor oder nach der Aufgabenauswahl.

3.3.2.3 Gestaltung der Fahrzeugautomation

Die simulierte Fahrzeugautomation glich derjenigen in Studie 2. Für die Bedingung der ereignis-basierten Situationsankündigung sowie der Kombinationsbedingung wurde der in Studie 2 beschriebene dreistufige Übernahmeprozess, der mit Beginn der Situationsankündigung initiiert wurde, realisiert. Im Falle der rein start-basierten Vorausschau gab es keine ereignis-basierte Ankündigung.

3.3.2.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Zur Anzeige des Systemstatus (z. B. Fahren im manuellen oder automatisierten Modus, dringliche Übernahmeaufforderung) wurden dieselben Anzeigen wie in Studie 2 verwendet. Aufgrund der Ergebnisse aus Studie 2 waren alle Anzeigen spezifisch gestaltet, d. h. sie enthielten Informationen zum Grund der Übernahme und dem auszuführenden Manöver (siehe Abbildung 50). Wie in Studie 2 wurden die Anzeigenelemente des Übernahmeprozesses zeitgleich auf dem Tablet als Ausführungsort der fahrfremden Tätigkeit sowie dem Kombi-Instrument dargestellt, wo sie bis zur Systemdeaktivierung sichtbar waren. Die Entfernungsangabe bezog sich in allen Konzepten immer auf den Zeitpunkt, zu dem eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde, wenn der Fahrer bis dahin nicht übernommen hatte.

3.3.2.5 Fahrfremde Tätigkeit

Die Anforderung an die fahrfremde Tätigkeit bestand darin, die strategische Bearbeitung von Aufgaben beim hochautomatisierten Fahren abbilden zu können, um einen Einblick darin zu bekommen, wie Fahrer von hochautomatisierten Fahrzeugen die Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten planen. Die Fahrer sollten in die Situation gebracht werden, entscheiden zu müssen, welche Aufgaben noch sinnvoll begonnen werden können, um sie vor der nächsten Übernahme abschließen zu können.

Die Aufgabe von Studie 2 wurde an diese Bedürfnisse angepasst. Das Prinzip, zeitlich getaktete Texte auf dem Tablet abzuschreiben, wurde beibehalten. Die Fahrer konnten zu verschiedenen Zeitpunkten während der Fahrt eine von drei unterschiedlich langen Aufgaben auswählen (siehe Abbildung 51). Um den Anreiz der Bearbeitung zu stärken, konnten bei erfolgreicher Beendigung

mehr Punkte erzielt werden, je länger die Aufgabe war. Am Ende der Studie erhielten die Probanden einen zusätzlich zur Aufwandsentschädigung für die Versuchsteilnahme ausbezahlten Geldbetrag. Erfolgreich beendet war eine Aufgabe, wenn sie nach Abtippen durch Betätigung der Enter-Taste eingeloggt wurde.³⁴ Die Wort- und Zeichenanzahl war pro Satzlänge immer gleich lang, so dass die Aufgaben zu einem definierten Zeitpunkt zu Ende waren. Allerdings konnten nicht alle Aufgabenlängen rechtzeitig und komfortabel vor Erreichen der Systemgrenze beendet werden.

- **Kurze Aufgabe** (20 Punkte): Konnte rechtzeitig und komfortabel vor der Übernahme beendet werden (5 Wörter). Die Aufgabe endete zu dem Zeitpunkt, bei dem die Aufgabe in der zweiten Studie von den Fahrern der 1000 m bzw. 2000 m-Bedingung durchschnittlich pausiert wurde (ca. 500 m vor Erreichen der Systemgrenze).
- **Mittlere Aufgabe** (50 Punkte): Konnte vor der Übernahme beendet werden (9 Wörter). Allerdings wurde die Aufgabe so konstruiert, dass sie erst ca. 3 Sekunden vor der Übernahmeaufforderung endete. Dadurch sollte ein gewisser Zeitdruck für die Übernahme der Fahrzeugführung entstehen, da der Erhalt einer Übernahmeaufforderung ohne vorherige erfolgreiche Beendigung zum Aufgabenabbruch führte (Punktabzug 100 Punkte). Die Probanden hatten somit die Wahl, bei mittleren Aufgaben mehr Punkte zu erzielen als bei kurzen Aufgaben, nahmen dafür aber eine Übernahme der Fahrzeugführung unter Zeitdruck in Kauf.
- **Lange Aufgabe** (90 Punkte): Die Länge der Aufgabe wurde so gewählt, dass sie nicht erfolgreich vor der Übernahmeaufforderung beendet werden konnte (13 Wörter). Wurde die Fehlentscheidung vom Fahrer bemerkt, hatte er die Möglichkeit die Aufgabe mit Hilfe einer Abbruch-Taste abubrechen (Punktabzug: 20 Punkt). Wenn der Fahrer die Aufgabe bis zum Erreichen der Systemgrenze nicht abgebrochen hatte, geschah dies mit Auslösung der Übernahmeaufforderung (Punktabzug 100 Punkte). Ein selbst-initiiertes Abbrechen wurde geringer bestraft als ein systeminitiiertes Abbrechen. Wie bei der mittleren Aufgabe konnte eine zu lange Weiterbearbeitung langer Aufgaben zu Zeitdruck bei der Wiederaufnahme der Fahrtätigkeit führen.

³⁴ Wenn nicht eingeloggt wurde, gab es 50 Punkte Abzug und die theoretisch in der Aufgabe erzielten Punkte gingen verloren. Auch bei fehlerhaften Eingaben gab es Punktabzug.

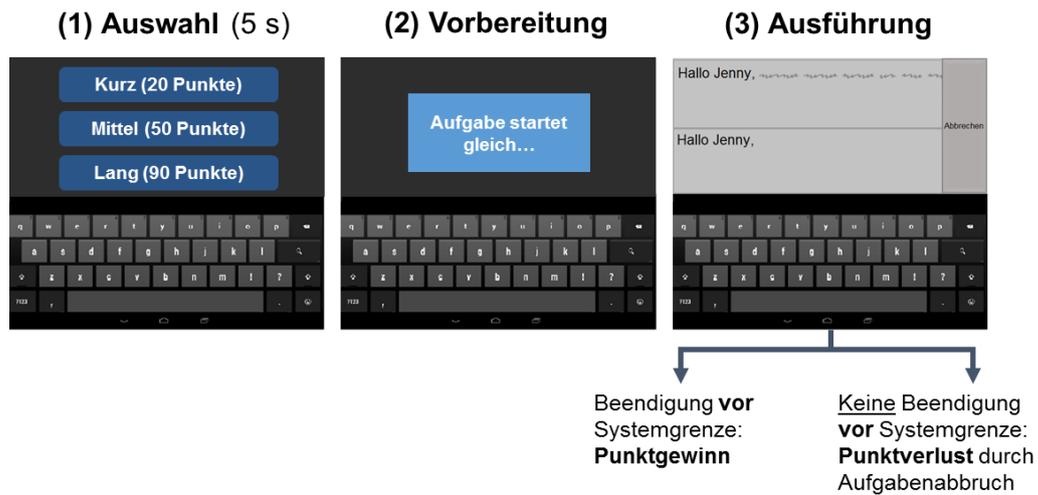


Abbildung 51: Aufgabenauswahl und -bearbeitung.

Um sicherzustellen, dass Entscheidungen bezüglich der Aufgabenauswahl während eines Fahrtabschnitts von allen Fahrern zum gleichen Zeitpunkt getroffen werden, wurde eine Aufgabe innerhalb einer Fahrtabschnittslänge immer zu einem festen Streckenpunkt dargeboten (Abbildung 52). Im kurzen Abschnitt konnten drei, im mittleren fünf und im langen Abschnitt sieben Aufgaben bearbeitet werden (15 Aufgabenangebote pro Fahrt). Zwischen der Beendigung einer langen und dem Beginn einer neuen Aufgabe lagen mindestens 20-30 Sekunden, bei Wahl einer kurzen oder mittleren Aufgabe entsprechend mehr.

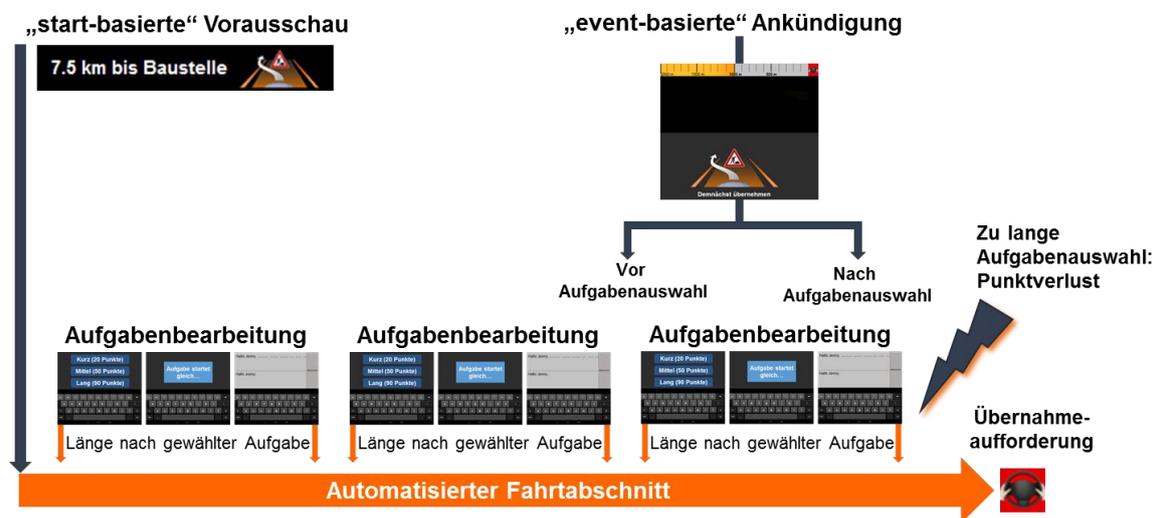


Abbildung 52: Veranschaulichung der Aufgabenauswahl und -bearbeitung innerhalb eines automatisierten Fahrtabschnitts.

3.3.2.6 Versuchssituationen

3.3.2.6.1 Hauptversuch

Die Strecke bestand aus einer zweispurigen Autobahn ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, die gerade und kurvige Abschnitte enthielt. Während der Fahrt war der linke Fahrstreifen meist dicht mit schneller fahrenden Fahrzeugen belegt (Geschwindigkeit > 120 km/h), während es auf der rechten Spur keinen zusätzlichen Verkehr gab. Während dem überwiegenden Teil der Strecke konnten die Probanden die Automation auf dem rechten Fahrstreifen nutzen und die fahrfremde Tätigkeit bearbeiten. An drei Stellen innerhalb einer Fahrt musste die manuelle Fahrzeugkontrolle übernommen werden (nach ca. 7.5 km, 13 km oder 18 km; Faktor „Länge des Fahrabschnitts“). Die Systemgrenze bestand aus der Baustellensituation von Studie 2 mit Notwendigkeit zum Spurwechsel (siehe Kapitel 3.2.2.6). Die Gesamtlänge der Strecke betrug ungefähr 40 km.

3.3.2.6.2 Fehlerfall

Die Fahrer erlebten die Fehlersituation, bei der die Entfernungsangabe zur Systemgrenze fehlerhaft war, während einer separaten Fahrt im Anschluss an die drei Konzeptfahrten. Hierbei wurde die Baustelle früher als durch das HMI angezeigt erreicht. Um sicherzustellen, dass die Probanden unabhängig von der gewählten Aufgabenlänge noch mit der Bearbeitung der Aufgabe beschäftigt waren (d. h. auch bei Auswahl einer kurzen Aufgabe), wenn sie die Systemgrenze erreichten und eine dringliche Übernahmeaufforderung erhielten, wurde die Systemgrenze 770 Meter früher als vom HMI angezeigt erreicht.

3.3.2.7 Abhängige Variablen

Um die Effekte des Anzeigekonzepts und des Anzeigzeitpunkts zu untersuchen, wurden die folgenden Maße erfasst.

3.3.2.7.1 Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit

Um die Auswirkungen der Anzeigekonzepte auf die Ausführung der fahrfremden Tätigkeit zu untersuchen, werden verschiedene Maße berechnet. Die Maße werden getrennt für die automatisierte Fahrt ohne Unterbrechung und für die letzte Aufgabe vor der Übernahme berichtet. Hierfür wird pro Abschnittslänge untersucht, welche Aufgaben von den Probanden ausgewählt werden, wie viele Wörter sie schreiben und wie viele Korrekturen sie vornehmen.

- **Auswahl der Aufgabenlänge:** kurz, mittel oder lang
- **Anzahl eingegebener Wörter:** Anzahl der geschriebenen Wörter pro Aufgabe.

- **Korrekturrate:** Anzahl der korrigierten Tippfehler gemessen an der Anzahl der geschriebenen Worte.

3.3.2.7.2 Zeitliche Aspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Um den Einfluss der experimentellen HMI-Manipulationen auf die zeitlichen Aspekte der Übernahme zu untersuchen, werden die folgenden Maße berechnet.

- **Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die fahrfremde Tätigkeit beenden.³⁵ Die Beendigung konnte durch erfolgreiches Einloggen der Aufgabe, Betätigung der Abbruchtaste oder durch Ausgabe der dringlichen Übernahmeaufforderung erfolgen. Ergänzend werden auch die Häufigkeit und Art der Aufgabenabbrüche durch den Fahrer oder das System berichtet.
- **Zeitpunkt der Handerkennung:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Hände ans Lenkrad nehmen.
- **Deaktivierungszeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem Fahrer die Automation deaktivieren.
- **Manöverzeitpunkt:** Meterabstand zur Systemgrenze, bei dem sich der Schwerpunkt des simulierten Probandenfahrzeugs bei einem erforderlichen Fahrstreifenwechsel erstmalig auf dem benachbarten Fahrstreifen befindet.

3.3.2.7.3 Qualitätsaspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Zur Beurteilung der Übernahmequalität wurde wie in den übrigen Studien die maximale Längs- und Querbeschleunigung herangezogen.

- **Maximale Längsverzögerung:** Maximal aufgetretene Längsverzögerung [m/s^2] zwischen der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung und dem Erreichen der Baustellenversperrung (225 Meter nach TOR).
- **Maximale Querbeschleunigung:** Maximal aufgetretene Querbeschleunigung [m/s^2] zwischen der Übernahme der manuellen Fahrzeugführung und dem Erreichen der Baustellenversperrung (225 Meter nach TOR).

³⁵ Als Referenzpunkt der Systemgrenze dient der Streckenpunkt, an dem eine dringliche Übernahmeaufforderung ausgegeben worden wäre (225 Meter vor Baustellenversperrung).

3.3.2.7.4 Selbstberichte

3.3.2.7.4.1 Fahrtbefragung

Nach jeder Situation wurden die Probanden gebeten, die Kritikalität der Situation auf der 10-stufigen „Skala zur Bewertung von Fahr- und Verkehrssituationen“ einzuschätzen (Neukum et al., 2008, siehe Studie 1, Kapitel 3.1.2.7.4). Zusätzlich sollten sie den Übernahmekomfort, die Nützlichkeit der Anzeige bei der Aufgabenauswahl sowie ihre Zufriedenheit mit der Aufgabenauswahl auf einer 15-stufigen Skala bewerten (siehe Abbildung 53).

- **Situationskritikalität:** „Wie bewerten Sie die Situation?“ (Neukum et al., 2008; [0-10])
- **Übernahmekomfort:** „Wie komfortabel war die Übernahme?“ [0-15]
- **Nützlichkeit der Ankündigung für Aufgabenauswahl:** „Wie hilfreich war die Anzeige bei der Auswahl der Aufgabe?“ [0-15]
- **Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl:** „Wie zufrieden sind Sie mit der Aufgabenauswahl?“ [0-15]

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Abbildung 53: Skala zur Erfassung des Übernahmekomforts, Nützlichkeit der Ankündigung für Aufgabenauswahl und Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl.

3.3.2.7.4.2 Nachbefragung

Am Ende jeder Fahrt wurden die Probanden gefragt, wie anstrengend Sie die Fahrt beurteilten. Nach Absolvieren aller Fahrten wurden die Probanden gefragt, welches Anzeigekonzept sie präferierten.

- „Wie anstrengend war die Fahrt?“ [0...220] (Eilers, Nachreiner, & Hänecke, 1986)
- „Welche Variante bevorzugen Sie abschließend?“ [Ankündigung, Vorausschau, Kombination]

3.3.2.8 Stichprobe

An der Studie nahmen 32 Probanden (15 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 32.7 Jahren (Altersspanne: 22-53 Jahre) teil. Alle Teilnehmer wurden aus dem WIVW-Testfahrerpanel rekrutiert. Die durchschnittliche Fahrleistung pro Jahr betrug 13191 km (SD: 13764 km).

3.3.2.9 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung und dem Ausfüllen der Datenschutzerklärung wurden die Versuchsteilnehmer über den Studienablauf informiert. Vor den Messfahrten fand ein ausführlicher Eingewöhnungsteil (Dauer: ca. 45 min) statt, der die folgenden Ziele hatte:

- Erklärung der Funktions- und Bedienweise des automatisierten Systems mit anschließender Übungsfahrt, um die Bedienung und Funktionsweise des Systems zu erleben.
- Erklärung der drei Anzeigekonzepte, anschließendes Erleben während der Fahrt mit der Instruktion, zu einem komfortablen Zeitpunkt zu übernehmen. Erleben einer dringlichen Übernahmeaufforderung, auf die nicht reagiert werden sollte, um die Systemreaktion bei ausbleibendem Fahrereingriff kennenzulernen (d. h. automatisches Nothaltmanöver). Dadurch erlebten die Probanden die dringliche Übernahmeaufforderung in der Fehlersituation am Ende der Fahrt nicht zum ersten Mal, da die Erfahrung mit Übernahme-situationen die Übernahmeleistung beeinflusst (siehe bspw. Gold, 2016; Körber et al., 2016; Wandtner, 2018).
- Instruktion über Ziele, Bedienung und Regeln der fahrfremden Tätigkeit. Die Probanden übten die verschiedenen Aufgabenlängen zunächst separat und dann in Verbindung mit Übernahme-situationen, um ein Bewusstsein für die Machbarkeit der verschiedenen Aufgabenlängen in Abhängigkeit der Entfernung zur Systemgrenze zu entwickeln. Dadurch sollten Lerneffekte während der Messfahrt vermieden werden. Dabei sollte einmal ein Aufgabenabbruch der zu langen Aufgabe durch eine Übernahmeaufforderung erlebt werden bzw. die Aufgabe selbst durch Verwendung der Abbruch-Taste abgebrochen werden.³⁶ Die Probanden wurden nicht explizit darüber informiert, dass die Ankündigungen stets *vor* oder *nach* der Aufgabenauswahl erfolgen würden (je nach der zugewiesenen between-subjects-Bedingung des Faktors „Ankündigungszeitpunkt“), erlebten das Konzept in der Übungsfahrt jedoch entsprechend der ihnen zugewiesenen Versuchsbedingung.

Jeder Teilnehmer absolvierte im Hauptteil der Untersuchung vier Fahrten. In den ersten drei Fahrten wurde je ein Anzeigekonzept erlebt. Insgesamt gab es sechs Reihenfolgen, in denen die Probanden die Konzepte erleben konnten, denen sie zufällig zugewiesen wurden. Für die Permutation der Abschnittslängen bis zur Übernahme gab es drei Reihenfolgen (Vermeidung von auf- und absteigenden Reihenfolgen), so dass pro Konzept eine andere Reihenfolge erlebt wurde. Nach jeder Übernahme sowie nach jeder Fahrt fand eine Befragung statt. Im Anschluss an die

³⁶ Von der Fehlerkorrektur in bereits abgeschlossenen Wörtern wurde den Fahrern abgeraten, da bei Löschen (und erneutem Schreiben) von bereits geschriebenen Wörtern ein Fertigstellen der Aufgabe innerhalb der vorgegebenen Zeit aufgrund der zeitlichen Taktung nicht garantiert werden konnte.

drei Konzeptfahrten erlebten die Fahrer die Fehlersituation während einer separaten Fahrt, da das Anzeigeconcept aus der dritten Systemfahrt aufgrund des Permutationsplans nicht immer dem für die Fehlerfahrt vorgesehenen Anzeigeconcept entsprach. Nach dem Versuch fand eine Nachbefragung statt. Die gesamte Versuchsdauer betrug 2.5 Stunden.

3.3.3 Ergebnisse

3.3.3.1 Vorgehen bei der Datenauswertung

Die Analyse gliedert sich in die Ergebnisse zur regulären Fahrt (= Anzeige der Distanz stets korrekt, Studienteil A) und zum Fehlerfall (= Situation mit fehlerhafter Distanzangabe, Studienteil B). Zur Analyse der Daten der regulären Fahrt wurde pro untersuchter Variable eine vollfaktorielle multivariate Varianzanalyse (ANOVA) mit den within-Faktoren „Anzeigeconcept“ (Ankündigung vs. Vorausschau vs. Kombination) und „Länge des Fahrtabschnitts“ (kurz vs. mittel vs. lang) sowie dem „Zeitpunkt der Ankündigung“ (vor vs. nach der Aufgabenauswahl) als between-Faktor durchgeführt. Für within-subject-Faktoren werden stets multivariate Statistiken berichtet, für between-subjects-Faktoren univariate Statistiken. Es wird ein generelles Signifikanzniveau von .05 angenommen, Nachtests werden nach Bonferroni adjustiert. Post-hoc-Tests zwischen Einzelbedingungen werden nur dann uneingeschränkt interpretiert, wenn der zugehörige vollfaktorielle Globaltest signifikant ist. Signifikante Effekte werden grafisch dargestellt.

Die Voraussetzungen der ANOVA wurden geprüft. In 10 von 15 Fällen muss auf Basis des Box-Tests die Annahme der Gleichheit der Kovarianzmatrizen verworfen werden. Die Gleichheit der Fehlervarianzen kann jedoch in den meisten Fällen angenommen werden, hier liefert der Levene-Test lediglich in 11 von 129 Fällen ein signifikantes Ergebnis. Da beide Annahmen bei gleich verteilten Gruppengrößen vernachlässigbar sind, wird die Durchführung der Tests als gerechtfertigt angesehen (Field, 2009). Die Prüfung auf Normalverteilung zeigt, dass diese nur in 42 von 129 Fällen auf Basis des K-S-Tests angenommen werden kann. Da die Varianzanalyse im Allgemeinen als robust gegenüber Verletzung dieser Annahme gilt (Howell, 2007), wurde von einer Transformation der Werte abgesehen. Eine Prüfung der Verteilung auf Ausreißer (+/- 3 Standardabweichungen vom Gruppenmittelwert entfernt) zeigt, dass in 7 von 15 Fällen keine Extremwerte vorliegen, in 3 von 15 ein Ausreißer, in 2 von 15 drei Extremwerte und in 3 von 15 Analysen mehr als drei Extremwerte. Von einem Ausschluss der Werte wurde aufgrund des within-subject-Designs (d. h. ein Ausschluss eines Wertes hätte zum Ausschluss aller Werte des jeweiligen Probanden geführt) abgesehen.

Bei der Analyse des Fehlerfalls wurde pro untersuchter Variable eine univariate Varianzanalyse (ANOVA) mit den between-Faktoren „Anzeige-konzept“ (Ankündigung vs. Vorausschau vs. Kombination) und „Zeitpunkt der Ankündigung“ (vor vs. nach der Aufgabenauswahl) durchgeführt. Auf Basis des Levene-Tests kann die Gleichheit der Fehlervarianzen für alle bis auf einen Test angenommen werden. Die Normalverteilungsannahme muss in vier von sechs Fällen zurückgewiesen werden. Extremwerte (± 3 Standardabweichungen vom Gruppenmittelwert entfernt) traten in drei der sechs Variablen auf (jeweils ein Extremwert).

3.3.3.1.1 Fehlende Fälle

Bei einem Fahrer fehlt aufgrund eines Versuchsleiterfehlers eine Bedingung des Anzeige-konzepts. Aufgrund des within-Designs ist dieser Datensatz nicht in den Varianzanalysen enthalten. Weitere fehlende Werte bei speziellen Variablen werden an der entsprechenden Stelle im Text berichtet.

3.3.3.2 Studienteil A: Reguläre Fahrt

Analysiert wird zunächst die Aufgabenbearbeitung während der automatisierten Fahrt (d. h. kein Fahrereingriff notwendig). Anschließend werden die Aufgaben vor dem Erreichen der Systemgrenze analysiert.

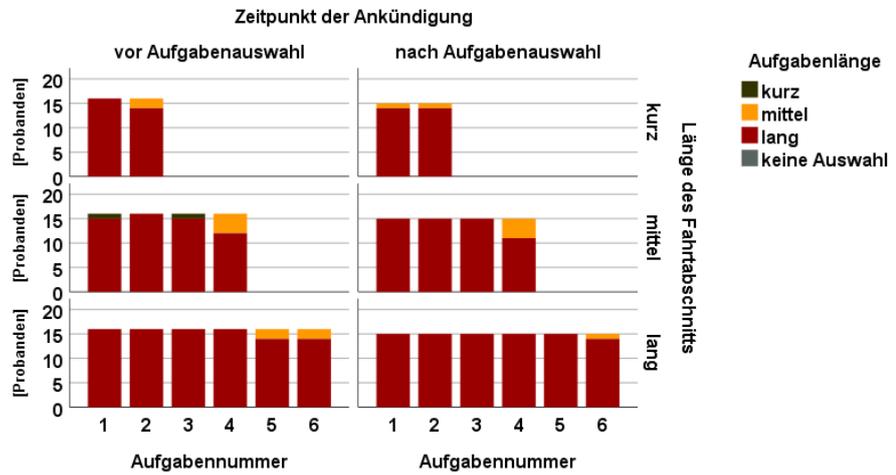
3.3.3.2.1 Aufgabenbearbeitung während automatisierter Fahrt (ohne letzte Aufgabe vor Systemgrenze)

Auswahl der Aufgabenlänge: Da ein Fahrer die Vorausschaubedingung nicht erlebte, reduziert sich das Set der möglichen Aufgaben von 1152 auf 1140. Zwei Fahrer wählten aufgrund von Unterbrechungen im Versuchsablauf jeweils in einem Fall keine Aufgabe aus.

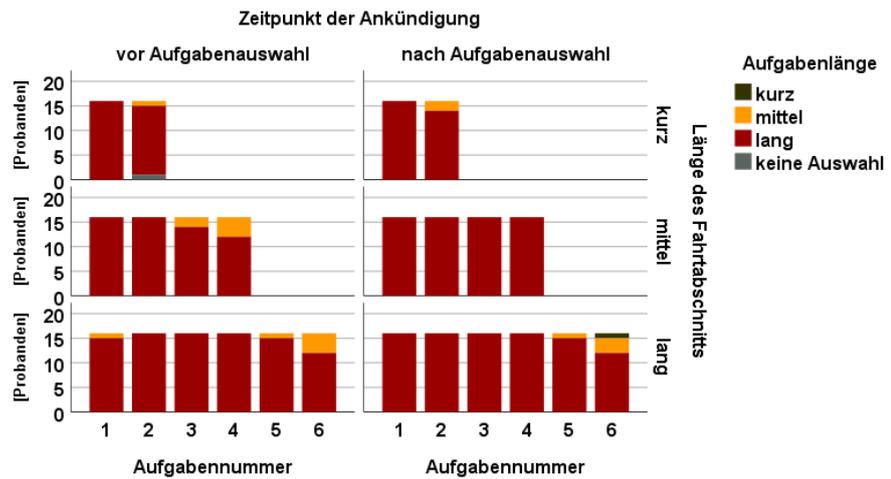
Abbildung 54 stellt die Verteilung der ausgewählten Aufgaben getrennt nach den drei Fahrtabschnittslängen für jedes Anzeige-konzept dar. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass in Abhängigkeit des Anzeige-konzepts unterschiedliche Strategien hinsichtlich der Aufgabenauswahl verfolgt werden: Bei der start-basierten Vorausschau und der Kombinationsbedingung wird sowohl zu Beginn eines automatisierten Fahrtabschnitts als auch über den Fahrtverlauf in den meisten Fällen eine lange Aufgabe ausgewählt. Mittlere Aufgaben werden nur vereinzelt ausgewählt, wenn die Fahrer sich der Systemgrenze annähern (entsprechend einer höheren Aufgabennummer in Abbildung 54). Bei der ereignis-basierten Ankündigung, bei der die Entfernung zur Systemgrenze nicht frühzeitig in die Aufgabenauswahl einbezogen werden konnte (between-Bedingung: Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl; rechte Hälfte der Grafik), wird

im Streckenverlauf (vor allem sichtbar bei langem Fahrtabschnitt) früher zur Bearbeitung von mittleren oder kurzen Aufgaben übergegangen. Dies gilt auch für das Konzept, in dem die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl erfolgt (linke Hälfte der Grafik), was ein Hinweis darauf ist, dass eine strategische Aufgabenbearbeitung vor allem durch eine kontinuierliche Anzeige der Entfernung zur Systemgrenze begünstigt wird.

Vorausschau



Kombination



Ankündigung

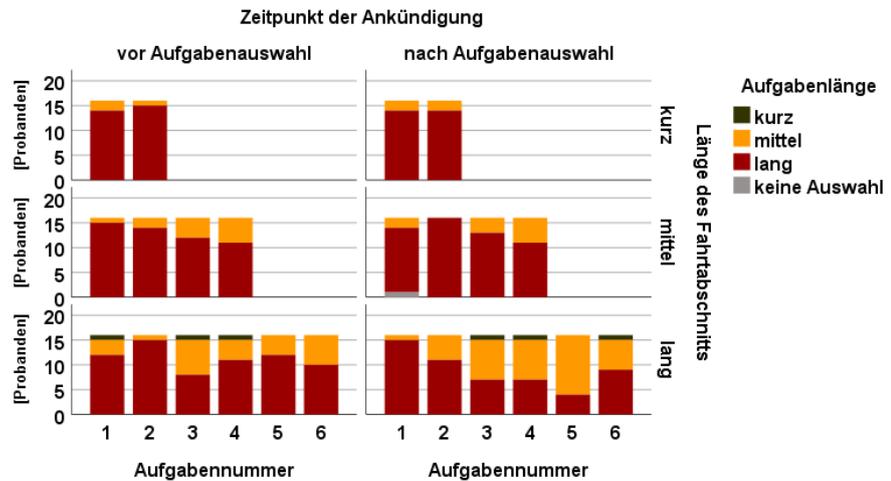


Abbildung 54: Verteilung der ausgewählten Aufgaben innerhalb eines Fahrtabschnitts, getrennt nach Anzeigekonzept (oben: Vorausschau, Mitte: Kombination, unten: Ankündigung), Zeitpunkt der Ankündigung und Fahrtabschnittlänge.

Anzahl eingegebener Wörter: In insgesamt neun Fällen (betrifft 8 Fahrer) wird eine Aufgabe von den Probanden aufgrund von Problemen beim Versuchsablauf nicht bearbeitet oder kann aufgrund eines technischen Fehlers nicht analysiert werden. Bei diesen Probanden geht somit pro Fahrtabschnitt jeweils eine Aufgabe weniger in die Berechnung der Anzahl der eingegebenen Wörter pro Bedingung und Fahrtabschnitt ein (gilt auf für Korrekturrate). Weiterhin fehlt bei einem Probanden aufgrund eines technischen Fehlers ein ganzer Fahrtabschnitt (Ankündigung, mittlerer Abschnitt) und wie oben erwähnt bei einem Probanden eine ganze HMI-Bedingung (start-basiert). Diese Fahrer können deswegen nicht in die Messwiederholungs-ANOVA einbezogen werden.

Bezüglich der durchschnittlich eingegebenen Wörter pro Aufgabe, findet sich sowohl ein signifikanter Haupteffekt des Anzeigeconzepts als auch eine Interaktion mit der Abschnittslänge (siehe Abbildung 55 und Tabelle 51). Ein Vergleich der Anzeigeconzepte pro Abschnittslänge kommt zu dem Ergebnis, dass sich diese nur im langen Fahrtabschnitt in ihrer Wirkung auf die geschriebene Wortanzahl unterscheiden (siehe Tabelle 52). In der Vorausschau und Kombinationsbedingung, in der das Wissen über die zur Verfügung stehende Restdistanz im automatisierten Modus in die Entscheidung über die Aufgabe immer miteinbezogen werden konnte, geben die Probanden durchschnittlich mehr Wörter pro Aufgabe ein als in der Bedingung mit reiner Ankündigung (siehe Tabelle 53 und Abbildung 55).

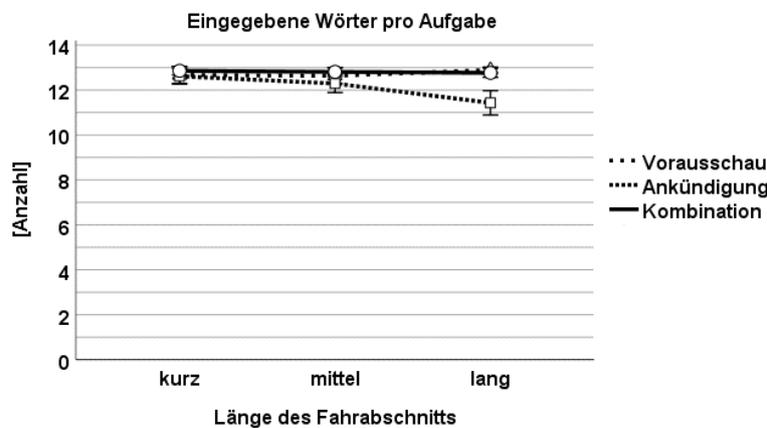


Abbildung 55: Eingegebene Wörter pro Aufgabe, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 51: ANOVA eingegebene Wörter pro Aufgabe.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Konzept	8.87	2	27	.001	0.40
Konzept * Zeitpunkt	0.55	2	27	.585	0.04
Abschnittslänge	2.74	2	27	.083	0.17
Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.19	2	27	.321	0.08
Konzept * Abschnittslänge	5.72	4	25	.002	0.48
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.55	4	25	.704	0.08
Zeitpunkt	0.02	1	28	.881	0.00

Tabelle 52: Nachtest-ANOVA eingegebene Wörter pro Aufgabe, getrennt nach Abschnittslänge. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .017.

Effekt	Abschnittslänge: kurz					Abschnittslänge: mittel					Abschnittslänge: lang				
	F	df ₁	df ₂	p	η ²	F	df ₁	df ₂	p	η ²	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.20	2	28	.317	0.08	2.36	2	27	.114	0.15	18.98	2	28	<.001	0.58
Konzept * Zeitpunkt	0.13	2	28	.878	0.01	0.21	2	27	.809	0.02	1.42	2	28	.259	0.09
Zeitpunkt	0.00	1	29	.982	0.00	0.87	1	28	.358	0.03	0.62	1	29	.439	0.02

Tabelle 53: Kontraste eingegebene Wörter pro Aufgabe zwischen den Anzeige Konzepten in langem Fahrtabschnitt. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	39.26	1	29	<.001	0.58
Ankündigung vs. Kombination	29.87	1	29	<.001	0.51

Korrekturrate: Bei Betrachten der Korrekturhäufigkeit von Fehlern während der Aufgabenbearbeitung zeigt sich kein signifikanter Effekt der experimentellen Faktoren (siehe Tabelle 54).

Tabelle 54: ANOVA Korrekturrate.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.70	2	27	.508	0.05
Konzept * Zeitpunkt	0.24	2	27	.786	0.02
Abschnittslänge	3.19	2	27	.057	0.19
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.83	2	27	.448	0.06
Konzept * Abschnittslänge	1.55	4	25	.217	0.20
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.80	4	25	.538	0.11
Zeitpunkt	2.23	1	28	.146	0.07

3.3.3.2.2 Aufgabenbearbeitung in letzter Aufgabe vor Übernahme

Auswahl der Aufgabenlänge: Das Datenset ist wegen der fehlenden HMI-Bedingung eines Fahrers um drei Situationen auf insgesamt 285 Fälle reduziert. Zunächst lässt sich feststellen, dass fast alle Probanden noch eine Aufgabe annehmen, auch wenn sie in den entsprechenden Bedingungen wissen, dass bald eine Übernahme bevorsteht. Nur in vier Fällen wird keine Aufgabe mehr angenommen. Abbildung 56 zeigt die Anzahl an Aufgaben einer bestimmten Länge, die bei der letzten Aufgabe vor der Übernahme ausgewählt werden, getrennt nach Anzeige Konzept, Ankündigungszeitpunkt und Fahrtabschnittslänge. Alle Fahrer, die eine Information über die verbleibende Reststrecke hatten, sowie Fahrer der Ankündigungsbedingung, bei der die Ankündigung vor der Aufgabenauswahl erfolgte, treffen – bis auf eine Ausnahme – eine richtige Entscheidung bezüglich der Aufgabenwahl, indem sie keine lange Aufgabe wählen.³⁷ In ungefähr zwei Drittel der Fälle wird eine kurze Aufgabe und damit eine komfortable Beendigung gewählt. Im Unterschied zu den Bedingungen, die eine strategische Auswahl ermöglichen, wählt die Mehrheit der Probanden der ereignis-basierten Ankündigungsbedingung

³⁷ Als richtig wurden mittlere und lange Aufgaben gezählt, die vor der Übernahme der Fahrzeugkontrolle beendet werden konnten.

(Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) eine falsche (lange) Aufgabe, die vor der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle abgebrochen werden musste. Nur in drei Fällen wurde in dieser Bedingung eine kurze Aufgabe gewählt. In den restlichen Fällen wird durch die Auswahl von mittleren Aufgaben in Kauf genommen, die Aufgabe nicht komfortabel beenden zu können.

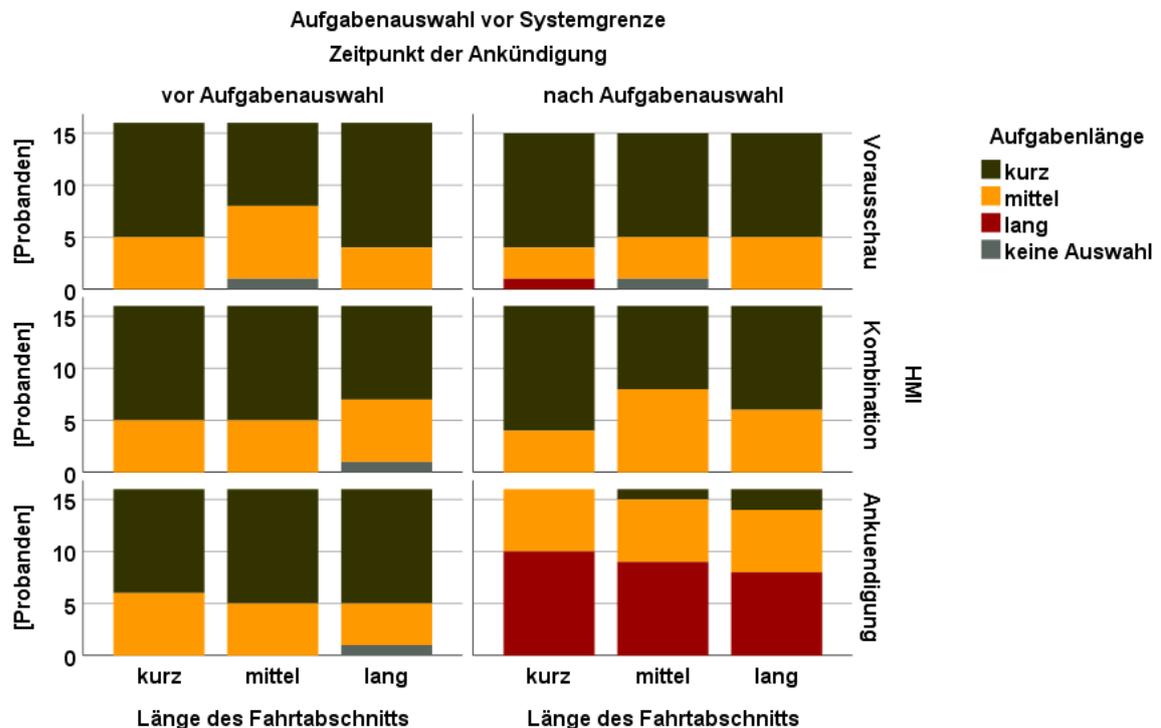


Abbildung 56: Auswahl der letzten Aufgabe vor der Übernahme.

Anzahl eingegebener Wörter: Bezüglich der vor der Übernahme noch geschriebenen Wörter zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Experimentalbedingungen (siehe Tabelle 55). Im Mittel wurden noch sechs Wörter vor der Übernahme eingegeben ($M = 6.25$, $SD = 2.08$).

Tabelle 55: ANOVA eingegebene Wörter in letzter Aufgabe vor Übernahme.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η^2
Konzept	1.10	2	22	.349	0.09
Konzept * Zeitpunkt	2.58	2	22	.099	0.19
Abschnittlänge	0.46	2	22	.639	0.04
Abschnittlänge * Zeitpunkt	0.47	2	22	.630	0.04
Konzept * Abschnittlänge	0.96	4	20	.452	0.16
Konzept * Abschnittlänge * Zeitpunkt	0.34	4	20	.849	0.06
Zeitpunkt	0.45	1	23	.507	0.02

Korrekturrate: Neben den vier Fällen, in denen vier Fahrer keine Aufgabe auswählen, kann die Korrekturrate in weiteren neun Fällen (drei Fahrer betreffend) aufgrund technischer Fehler bzw. einer fehlenden Bedingung nicht bestimmt werden. Wie in Tabelle 56 ersichtlich, findet sich kein signifikanter Effekt des Anzeigeconzepts, aber eine Zweifach-Interaktion aus Anzeigezeitpunkt und Abschnittlänge. Wie in Abbildung 57 deutlich wird, hat die Abschnittlänge einen Einfluss auf die Korrekturrate, wenn die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl stattfindet (siehe Tabelle 58). Hier steigt die Fehlerrate bei langen Abschnitten im Vergleich zu mittleren an (siehe Tabelle

59). Findet die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl statt, hat die Länge keinen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate (siehe Tabelle 57).

Tabelle 56: ANOVA Korrekturrate.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.97	2	22	.163	0.15
Konzept * Zeitpunkt	1.37	2	22	.274	0.11
Abschnittslänge	2.75	2	22	.086	0.20
Abschnittslänge * Zeitpunkt	4.23	2	22	.028	0.28
Konzept * Abschnittslänge	0.37	4	20	.828	0.07
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.15	4	20	.362	0.19
Zeitpunkt	0.03	1	23	.876	0.00

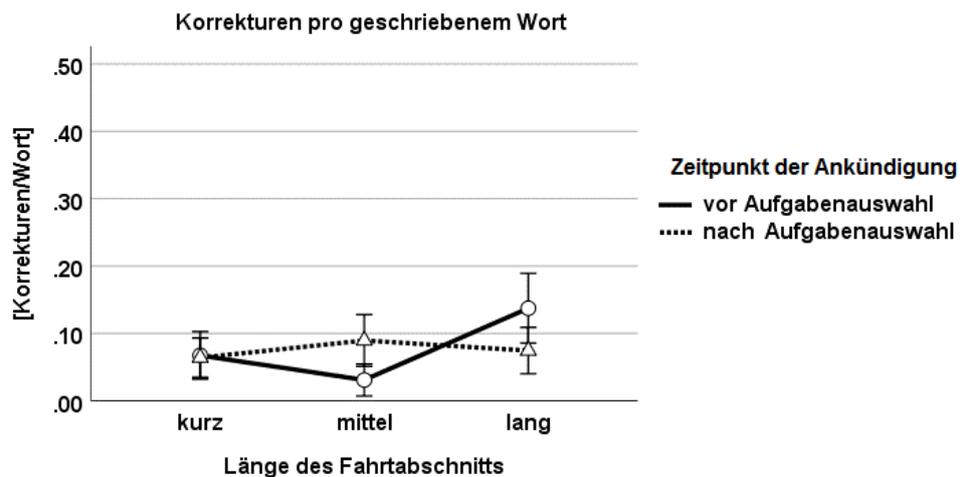


Abbildung 57: Korrekturrate, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 57: Nachtest-ANOVA Korrekturrate. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	6.92	2	10	.013	0.58
Abschnittslänge	0.39	2	10	.686	0.07
Konzept * Abschnittslänge	0.47	4	8	.756	0.19

Tabelle 58: Nachtest-ANOVA Korrekturrate. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.07	2	11	.930	0.01
Abschnittslänge	7.98	2	11	.007	0.59
Konzept * Abschnittslänge	1.40	4	9	.309	0.38

Tabelle 59: Kontraste Korrekturrate zwischen den Abschnittslängen. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .0167.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
kurz vs. mittel	1.82	1	12	.203	0.13
kurz vs. lang	4.64	1	12	.052	0.28
mittel vs. lang	17.29	1	12	.001	0.59

3.3.3.2.3 Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung

Für alle Variablen, die zeitliche Aspekte berücksichtigen, können zwei Probanden nicht in die Auswertung eingeschlossen werden. Bei einer Versuchsperson fehlt eine ganze Bedingung (3

Fälle), bei einer weiteren führte die Aufgabe zweimal systemseitig zu Problemen (2 Fälle). Zusätzlich zu den beiden einleitend genannten Fällen, können weitere vier Versuchspersonen nicht in die Auswertung einbezogen werden, da diese bei der letzten Aufgabe vor der Übernahme keine Aufgabe ausgewählt haben.

Wie aus Tabelle 60 ersichtlich, findet sich eine marginal signifikante Interaktion aus dem Anzeigekonzept und dem Zeitpunkt der Ankündigung. Da erwartet wurde, dass die Probanden in der Ankündigungsbedingung (Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) aufgrund der fälschlichen Auswahl langer Aufgaben die fahrfremde Tätigkeit länger weiterbearbeiten würden als in der Bedingung mit Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl (was der Interaktion entsprechen würde), werden weiterführende Nachtests in diesem Fall als gerechtfertigt angesehen. Post-hoc-Tests getrennt nach Ankündigungszeitpunkt zeigen, dass der Abstand zur Systemgrenze, an dem die Aufgabe beendet wird, tatsächlich vom Anzeigekonzept abhängt, wenn die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl stattfindet (siehe Tabelle 61). Die Ankündigungsbedingung unterscheidet sich hierbei von den beiden anderen Anzeigekonzepten dahingehend, dass die Aufgabe später beendet wird (siehe Tabelle 63 und Abbildung 58). Findet die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl statt, zeigt sich kein statistisch signifikanter Effekt des Anzeigekonzepts (siehe Tabelle 62).

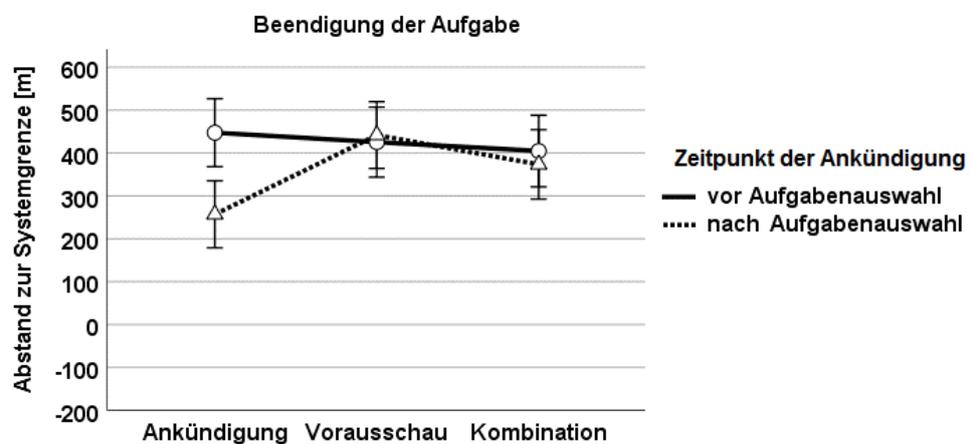


Abbildung 58: Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung, Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 60: ANOVA Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	2.02	2	23	.156	0.15
Konzept * Zeitpunkt	2.78	2	23	.083	0.20
Abschnittlänge	0.05	2	23	.949	0.01
Abschnittlänge * Zeitpunkt	0.30	2	23	.745	0.03
Konzept * Abschnittlänge	0.51	4	21	.729	0.09
Konzept * Abschnittlänge * Zeitpunkt	1.01	4	21	.424	0.16
Zeitpunkt	1.18	1	24	.289	0.05

Tabelle 61: Nachtest-ANOVA Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	5.86	2	11	.019	0.52
Abschnittslänge	0.43	2	11	.663	0.07
Konzept * Abschnittslänge	1.52	4	9	.277	0.40

Tabelle 62: Nachtest-ANOVA Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.33	2	11	.723	0.06
Abschnittslänge	0.07	2	11	.929	0.01
Konzept * Abschnittslänge	1.14	4	9	.398	0.34

Tabelle 63: Kontraste Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung zwischen den Anzeige Konzepten. Ankündigung nach Aufgabenauswahl.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau und Kombination	5.11	1	12	.043	0.30

In Abbildung 59 ist die Verteilung der Aufgabenabbrüche dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Aufgabenabbrüche vor allem bei langen Aufgaben stattfinden. Aufgabenabbrüche aufgrund einer falsch gewählten Aufgabe gibt es (fast) nur in der ereignis-basierten Bedingung, bei der die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl erfolgte. Findet die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl statt, wird die Aufgabe in den meisten Fällen (133 von 141 gültigen Fällen) nicht abgebrochen. Tabelle 98 im Anhang zeigt eine tabellarische Aufstellung.

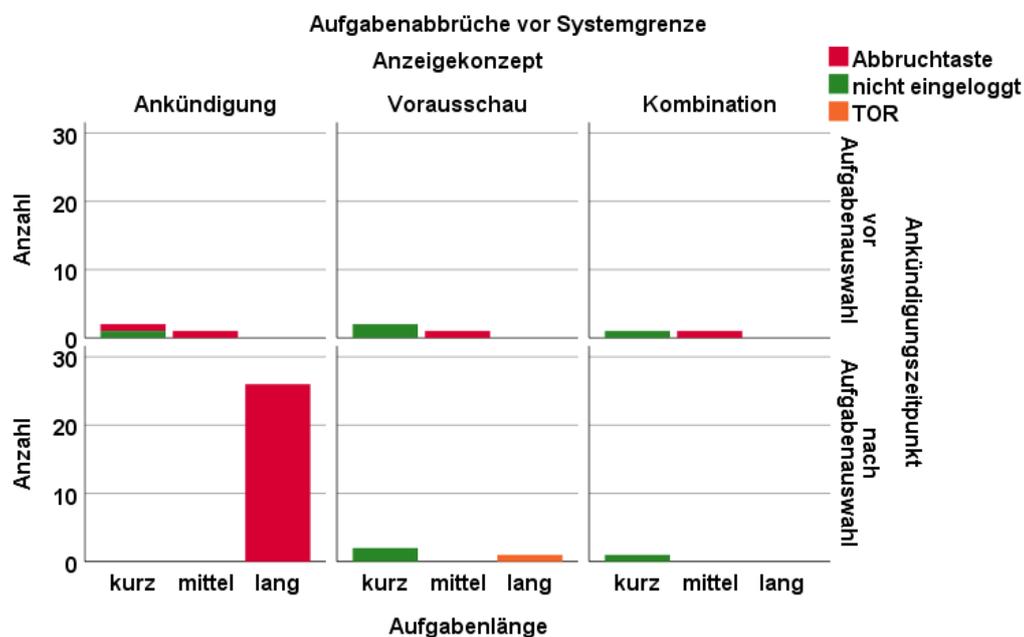


Abbildung 59: Aufgabenabbrüche und Abbruchgründe.

3.3.3.2.4 Zeitpunkt der Handerkennung

Es finden sich keine signifikanten Effekte der unabhängigen Variablen, was den Zeitpunkt der Handerkennung anbelangt (siehe Tabelle 64).

Tabelle 64: ANOVA Zeitpunkt der Handerkennung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.11	2	27	.900	0.01
Konzept * Zeitpunkt	2.07	2	27	.146	0.13
Abschnittslänge	0.26	2	27	.775	0.02
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.26	2	27	.773	0.02
Konzept * Abschnittslänge	0.16	4	25	.955	0.03
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.38	4	25	.823	0.06
Zeitpunkt	1.46	1	28	.237	0.05

3.3.3.2.5 Deaktivierungszeitpunkt

Ebenfalls beeinflussen die experimentellen Faktoren den Deaktivierungszeitpunkt nicht signifikant (siehe Tabelle 65).

Tabelle 65: ANOVA Deaktivierungszeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.56	2	27	.228	0.10
Konzept * Zeitpunkt	2.08	2	27	.145	0.13
Abschnittslänge	0.03	2	27	.968	0.00
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.37	2	27	.694	0.03
Konzept * Abschnittslänge	0.09	4	25	.986	0.01
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.92	4	25	.139	0.24
Zeitpunkt	0.98	1	28	.330	0.03

Abbildung 60 stellt die Verteilung der ausgegebenen Übernahmeaufforderungen dar (d. h. Probanden übernehmen die manuelle Fahrzeugführung nicht vor Erreichen der Systemgrenze). Wie die Abbildung zeigt, werden deskriptiv die meisten Übernahmeaufforderungen in der Ankündigungsbedingung ausgegeben, wenn die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl erfolgt.

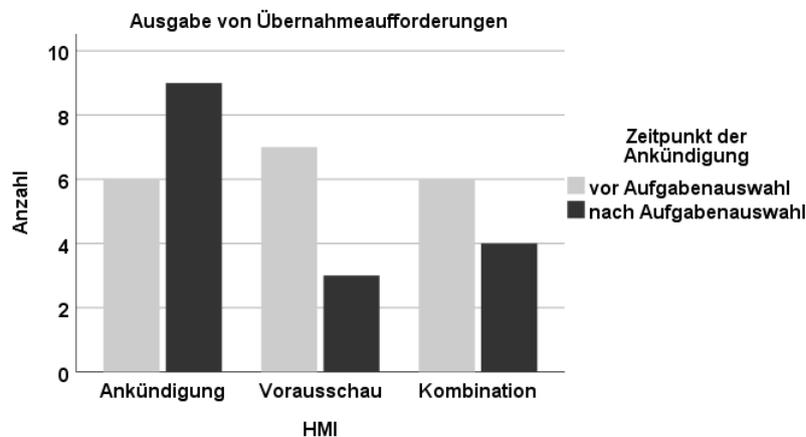


Abbildung 60: Anzahl der Übernahmeaufforderungen pro Ankündigungsbedingung.

3.3.3.2.6 Manöverzeitpunkt

Es finden sich keine signifikanten Effekte der unabhängigen Variablen, was den Manöverzeitpunkt anbelangt (siehe Tabelle 66).

Tabelle 66: ANOVA Manöverzeitpunkt.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.37	2	27	.271	0.09
Konzept * Zeitpunkt	0.54	2	27	.592	0.04
Abschnittslänge	0.55	2	27	.585	0.04
Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.57	2	27	.227	0.10
Konzept * Abschnittslänge	1.93	4	25	.136	0.24
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.98	4	25	.434	0.14
Zeitpunkt	0.27	1	28	.610	0.01

3.3.3.2.7 Qualitätsaspekte der Übernahme der Fahrzeugkontrolle

Bei der **maximalen Längsverzögerung** zeigt sich eine Interaktion aus Anzeigekonzept und Ankündigungszeitpunkt (siehe Tabelle 67). Getrennte Nachtest pro Zeitpunktbedingung ergeben jedoch keinen signifikanten Haupteffekt des Anzeigekonzepts (siehe Tabelle 68). Außerdem findet sich eine signifikante Interaktion aus Anzeigekonzept und der Länge des Fahrtabschnitts. Auch hier ergeben Nachtests getrennt nach der Abschnittslänge jedoch keine signifikanten Effekte (siehe Tabelle 69).

Tabelle 67: ANOVA maximale Längsverzögerung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.11	2	27	.892	0.01
Konzept * Zeitpunkt	5.24	2	27	.012	0.28
Abschnittslänge	0.23	2	27	.793	0.02
Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.72	2	27	.198	0.11
Konzept * Abschnittslänge	3.48	4	25	.022	0.36
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.80	4	25	.534	0.11
Zeitpunkt	1.14	1	28	.294	0.04

Tabelle 68: Nachtest-ANOVA maximale Längsverzögerung, Effekt des Anzeigekonzepts getrennt nach Ankündigungszeitpunkt. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Zeitpunkt	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vor Auswahl	Konzept	2.55	2	12	.119	0.30
Ankündigung nach Auswahl	Konzept	2.43	2	14	.125	0.26

Tabelle 69: Nachtest-ANOVA maximale Längsverzögerung, Effekt des Anzeigekonzepts getrennt nach Abschnittslänge. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Abschnittslänge	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Kurz	Konzept	1.50	2	28	.240	0.10
Mittel	Konzept	2.00	2	28	.155	0.13
Lang	Konzept	0.37	2	29	.695	0.03

Was die **maximale Querb beschleunigung** anbelangt, finden sich keine signifikanten Effekte der unabhängigen Variablen (siehe Tabelle 70).

Tabelle 70: ANOVA maximale Querbeschleunigung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.05	2	27	.952	0.00
Konzept * Zeitpunkt	0.05	2	27	.953	0.00
Abschnittslänge	0.63	2	27	.540	0.05
Abschnittslänge * Zeitpunkt	2.90	2	27	.072	0.18
Konzept * Abschnittslänge	1.53	4	25	.224	0.20
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	1.16	4	25	.351	0.16
Zeitpunkt	0.12	1	28	.733	0.00

3.3.3.2.8 Selbstberichte

Auch auf die selbstberichtete **Situationskritikalität** hat keine der experimentellen Variablen einen signifikanten Einfluss (siehe Tabelle 71).

Tabelle 71: ANOVA Situationskritikalität.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	2.83	2	28	.076	0.17
Konzept * Zeitpunkt	2.59	2	28	.093	0.16
Abschnittslänge	0.31	2	28	.736	0.02
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.30	2	28	.744	0.02
Konzept * Abschnittslänge	0.36	4	26	.836	0.05
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.44	4	26	.777	0.06
Zeitpunkt	0.28	1	29	.602	0.01

Die Frage, wie **hilfreich** die Probanden die Anzeigeconzepte für die Aufgabenauswahl beurteilen, hängt sowohl vom Anzeigeconzept als auch vom Zeitpunkt der Ankündigung ab, wie Abbildung 61 und Tabelle 72 zeigen. Auch die Interaktion aus den beiden Faktoren ist statistisch signifikant.

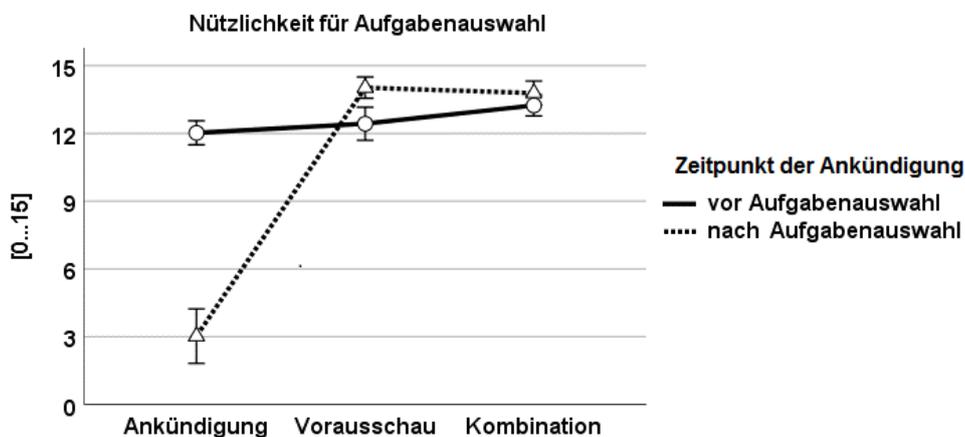


Abbildung 61: Nützlichkeit für Aufgabenauswahl („Wie hilfreich war die Anzeige bei der Auswahl der Aufgabe?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 72: ANOVA Nützlichkeit für Aufgabenauswahl.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	55.05	2	25	<.001	0.82
Konzept * Zeitpunkt	35.05	2	25	<.001	0.74
Abschnittslänge	0.19	2	25	.828	0.02
Abschnittslänge* Zeitpunkt	0.40	2	25	.672	0.03
Konzept * Abschnittslänge	1.50	4	23	.235	0.21
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.14	4	23	.967	0.02
Zeitpunkt	21.56	1	26	<.001	0.45

Nachtests zwischen den Anzeige Konzepten getrennt nach dem Zeitpunkt der Ankündigung ergeben jeweils einen signifikanten Effekt des Anzeige konzepts (siehe Tabelle 73 und Tabelle 74). Findet die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl statt, wird die reine Ankündigungsbedingung als weniger hilfreich beurteilt als die Vorausschau und die Kombination (siehe Tabelle 75). Findet die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl statt, wird die reine Ankündigung als weniger hilfreicher eingeschätzt als die Kombination, während zur reinen Vorausschau kein signifikanter Unterschied gefunden wurde (siehe Tabelle 76).

Tabelle 73: Nachtest-ANOVA Nützlichkeit für Aufgabenauswahl. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	47.40	2	12	<.001	0.89
Abschnittslänge	0.35	2	12	.713	0.06
Konzept * Abschnittslänge	0.67	4	10	.627	0.21

Tabelle 74: Nachtest-ANOVA Nützlichkeit für Aufgabenauswahl. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	6.03	2	12	.015	0.50
Abschnittslänge	0.14	2	12	.870	0.02
Anzeige konzept * Abschnittslänge	1.08	4	10	.416	0.30

Tabelle 75: Kontraste Nützlichkeit für Aufgabenauswahl zwischen den Anzeige Konzepten. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Adjustiertes Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	83.84	1	13	<.001	0.87
Ankündigung vs. Kombination	99.49	1	13	<.001	0.88

Tabelle 76: Kontraste Nützlichkeit für Aufgabenauswahl zwischen den Anzeige Konzepten. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Adjustiertes Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	0.65	1	13	.435	0.05
Ankündigung vs. Kombination	12.63	1	13	.004	0.49

Ein Vergleich der Zeitpunkte innerhalb der Anzeige konzepte (Ankündigung vor vs. nach der Auswahl) zeigt, dass die Probanden, welche die Ankündigung stets *vor* der Aufgabenauswahl erhalten, die alleinige Ankündigung als hilfreicher beurteilen als die Probanden, welche die Ankündigung stets *nach* der Aufgabenauswahl erhalten (siehe Tabelle 77).

Tabelle 77: Nachtest-ANOVA Nützlichkeit für Aufgabenauswahl, Effekt des Ankündigungszeitpunkts getrennt nach Anzeige konzept. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .017.

Konzept	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung	Zeitpunkt	84.06	1	28	<.001	0.75
Vorausschau	Zeitpunkt	6.03	1	29	.020	0.17
Kombination	Zeitpunkt	1.42	1	28	.243	0.05

Der durch die Probanden berichtete **Übernahmekomfort** ist in Abbildung 62 dargestellt. In dieser Variable findet sich eine Interaktion aus Anzeige konzept und Zeitpunkt der Ankündigung (siehe Tabelle 78). Keiner der anderen Haupteffekte oder Interaktionen ist statistisch signifikant. Nachtest pro Zeitpunktbedingung ergeben, dass sich der eingeschätzte Komfort nur dann zwischen den Anzeige Konzepten unterscheidet, wenn die Ankündigung *nach* der

Aufgabenauswahl stattfindet (Haupteffekt Konzept, siehe Tabelle 79), nicht aber, wenn sie davor passiert (Haupteffekt Konzept, siehe Tabelle 80). Bei der Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl wird die Ankündigungsbedingung als weniger komfortabel beurteilt als die Vorausschau (siehe Tabelle 81).

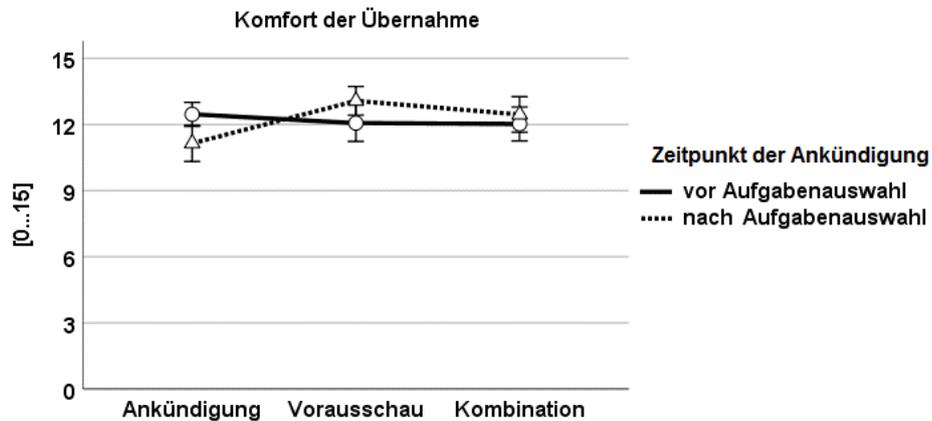


Abbildung 62: Übernahmekomfort („Wie komfortabel war die Übernahme?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 78: ANOVA Übernahmekomfort.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	2.21	2	27	.129	0.14
Konzept * Zeitpunkt	5.39	2	27	.011	0.29
Abschnittslänge	0.44	2	27	.649	0.03
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.14	2	27	.874	0.01
Konzept * Abschnittslänge	1.32	4	25	.290	0.17
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.89	4	25	.484	0.13
Zeitpunkt	0.01	1	28	.943	0.00

Tabelle 79: Nachtest-ANOVA Übernahmekomfort. Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	5.79	2	12	.017	0.49
Abschnittslänge	0.36	2	12	.704	0.06
Konzept * Abschnittslänge	1.55	4	10	.262	0.38

Tabelle 80: Nachtest-ANOVA Übernahmekomfort. Ankündigung *vor* Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.60	2	14	.562	0.08
Abschnittslänge	0.14	2	14	.867	0.02
Konzept * Abschnittslänge	0.98	4	12	.456	0.25

Tabelle 81: Kontraste Übernahmekomfort zwischen den Anzeige Konzepten. Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	12.42	1	13	.004	0.49
Ankündigung vs. Kombination	5.79	1	13	.032	0.31

Der Vergleich der Zeitpunkte der Ankündigung innerhalb der Anzeige konzepte zeigt keinen signifikanten Unterschied auf den erlebten Übernahmekomfort nach Alpha-Adjustierung (siehe Tabelle 82).

Tabelle 82: Nachtest-ANOVA Übernahmekomfort, Effekt des Ankündigungszeitpunkts getrennt nach Anzeigezept. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .017.

Konzept	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung	Zeitpunkt	6.18	1	29	.019	0.18
Vorausschau	Zeitpunkt	2.25	1	29	.145	0.07
Kombination	Zeitpunkt	0.61	1	29	.442	0.02

Die durch die Probanden angegebene **Zufriedenheit** mit dem Anzeigezept in Bezug auf die Aufgabenauswahl ist in Abbildung 63 dargestellt. Auch in dieser Variable ergibt die inferenzstatistische Analyse signifikante Haupteffekte des Anzeigezepts und des Zeitpunkts der Ankündigung, sowie eine signifikante Interaktion aus diesen Variablen (siehe Tabelle 83). Nachtest getrennt nach Zeitpunkt der Ankündigung zeigen, dass das Anzeigezept nur dann einen signifikanten Effekt auf die Zufriedenheit hat, wenn die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl stattfindet (siehe Tabelle 84 und Tabelle 85). Sowohl die Vorausschau (siehe Tabelle 86), als auch die Kombination werden zufriedenstellender bewertet als die reine Ankündigung.

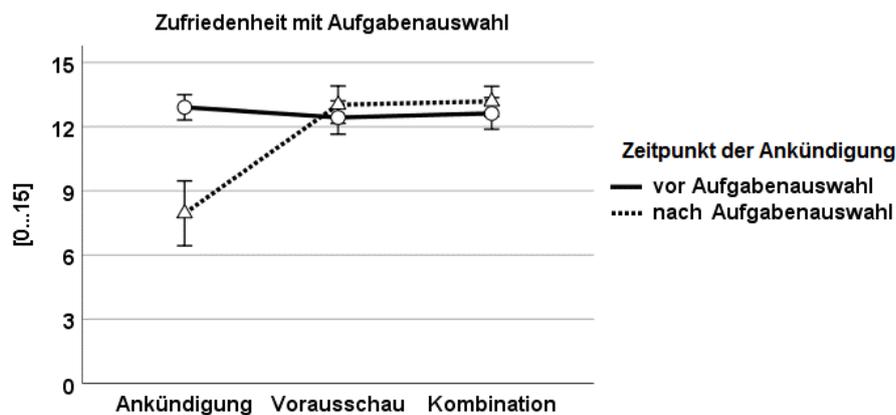


Abbildung 63: Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl („Wie zufrieden sind Sie mit der Aufgabenauswahl?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 83: ANOVA Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	10.59	2	24	.001	0.47
Konzept * Zeitpunkt	14.19	2	24	<.001	0.54
Abschnittslänge	0.17	2	24	.843	0.01
Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.21	2	24	.813	0.02
Konzept * Abschnittslänge	0.83	4	22	.523	0.13
Konzept * Abschnittslänge * Zeitpunkt	0.32	4	22	.859	0.06
Zeitpunkt	4.53	1	25	.043	0.15

Tabelle 84: Nachtest-ANOVA Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	12.60	2	11	.001	0.70
Abschnittslänge	0.03	2	11	.972	0.01
Konzept * Abschnittslänge	0.59	4	9	.676	0.21

Tabelle 85: Nachtest-ANOVA Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl. Ankündigung vor Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.57	2	12	.581	0.09
Abschnittslänge	1.01	2	12	.392	0.14
Konzept * Abschnittlänge	0.47	4	10	.760	0.16

Tabelle 86: Kontraste Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl zwischen den Anzeigekonzepten. Ankündigung nach Aufgabenauswahl. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	25.27	1	12	<.001	0.68
Ankündigung vs. Kombination	25.91	1	12	<.001	0.68

Beim Vergleich des Ankündigungszeitpunkts innerhalb der Anzeigekonzepte wird deutlich, dass dieser nur in der Ankündigungsbedingung einen signifikanten Effekt auf die angegebene Zufriedenheit hat (siehe Tabelle 87). Die reine Ankündigung wird als zufriedenstellender beurteilt, wenn sie *vor* der Aufgabenauswahl geschieht als wenn sie danach dargeboten wird.

Tabelle 87: Nachtest-ANOVA Zufriedenheit mit Aufgabenauswahl, Effekt des Ankündigungszeitpunkts getrennt nach Anzeigekonzept. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .017.

Konzept	Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung	Zeitpunkt	32.07	1	28	<.001	0.53
Vorausschau	Zeitpunkt	1.12	1	28	.298	0.04
Kombination	Zeitpunkt	1.24	1	28	.275	0.04

Die selbstberichtete **Beanspruchung** ist in Abbildung 64 dargestellt. Die Anzeigekonzepte unterscheiden sich signifikant voneinander (Tabelle 88). Die alleinige Ankündigungsbedingung wird als anstrengender erlebt als die Vorausschau und die Kombination (siehe Tabelle 89). Ein signifikanter Einfluss des Zeitpunkts der Ankündigung wurde nicht gefunden.

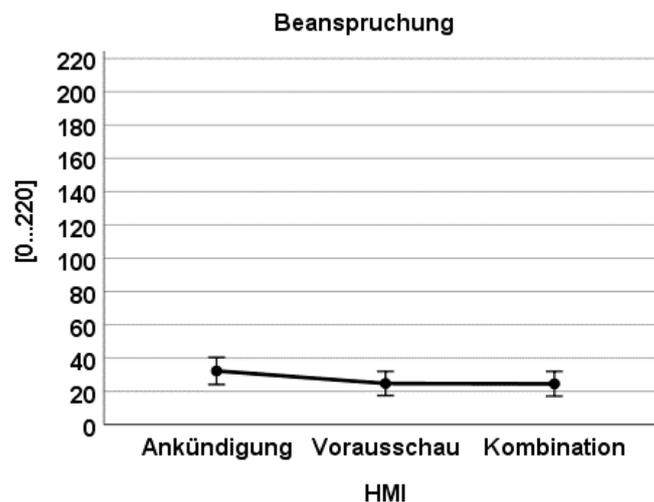


Abbildung 64: Beanspruchung („Wie anstrengend war die Fahrt?“), Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall.

Tabelle 88: ANOVA Beanspruchung.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	8.06	2	28	.002	0.37
Konzept * Zeitpunkt	0.20	2	28	.818	0.01
Zeitpunkt	0.90	1	29	.351	0.03

Tabelle 89: Kontraste Beanspruchung zwischen den Anzeige Konzepten. Angepasstes Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur: .025.

Kontrast	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Ankündigung vs. Vorausschau	16.68	1	29	<.001	0.37
Ankündigung vs. Kombination	10.49	1	29	.003	0.27

Die meisten Probanden präferieren die kombinierte Anzeigebedingung (siehe Abbildung 65).

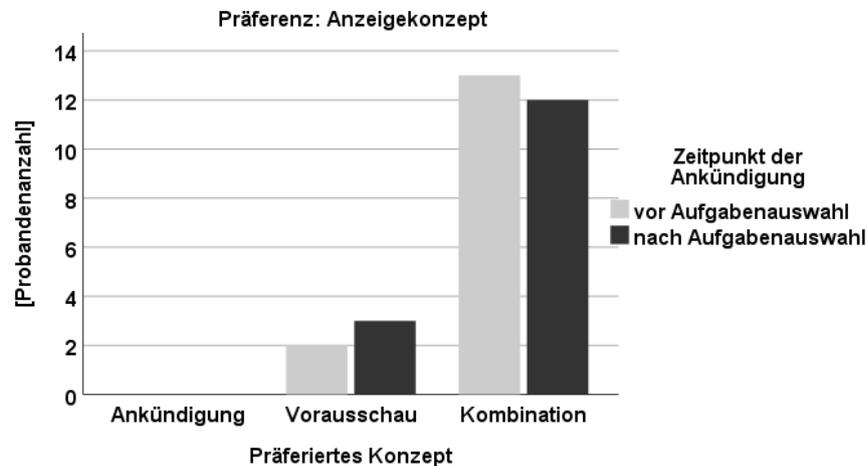


Abbildung 65: Präferenz der Anzeige Konzepte.

3.3.3.3 Studienteil B: Fehlerfall

In zwei Fällen kam die Fehlersituation nicht zu Stande, da eine falsche Strecke gestartet wurde, in einem Fall wurde kein Spurwechsel durchgeführt. Es ergeben sich keine signifikanten Effekte des Anzeige konzepts (Vergleich „Ankündigung“ vs. „Vorausschau“) und des Zeitpunkts der Ankündigung auf die untersuchten Variablen (siehe Tabelle 90 bis Tabelle 95). Im Mittel nehmen die Probanden die Hände 46.42 Meter nach der Übernahmeaufforderung ans Lenkrad (SD = 41.41), deaktivieren die Automation 80.42 Meter (SD = 51.35) nach der Übernahmeaufforderung und wechseln 179.77 Meter nach der Übernahmeaufforderung den Fahrstreifen (SD = 47.72).³⁸ Die Probanden bringen im Mittel eine maximale Verzögerung von -1.76 m/s² auf (SD = 1.70) und eine maximale Querbeschleunigung von 1.35 m/s² (SD = 0.49) auf. Die Fahrer selbst bewerten die Situation im Mittel als „unangenehm“ (M = 4.90, SD = 1.97).

Tabelle 90: ANOVA Zeitpunkt der Handerkennung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.24	1	26	.275	0.05
Zeitpunkt	0.77	1	26	.389	0.03
Konzept * Zeitpunkt	0.01	1	26	.932	0.00

³⁸ Die Spurversperrung wäre nach 225 Metern erreicht worden, wenn die Probanden den Fahrstreifen nicht gewechselt hätten.

Tabelle 91: ANOVA Deaktivierungszeitpunkt in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	3.27	1	26	.082	0.11
Zeitpunkt	0.54	1	26	.471	0.02
Konzept * Zeitpunkt	0.97	1	26	.334	0.04

Tabelle 92: ANOVA, Manöverzeitpunkt in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.16	1	25	.293	0.04
Zeitpunkt	0.24	1	25	.630	0.01
Konzept * Zeitpunkt	0.83	1	25	.370	0.03

Tabelle 93: ANOVA, maximale Längsverzögerung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	0.60	1	26	.446	0.02
Zeitpunkt	0.02	1	26	.885	0.00
Konzept * Zeitpunkt	0.69	1	26	.415	0.03

Tabelle 94: ANOVA, maximale Querbesehleunigung in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.75	1	26	.198	0.06
Zeitpunkt	1.63	1	26	.212	0.06
Konzept * Zeitpunkt	0.36	1	26	.555	0.01

Tabelle 95: ANOVA, Situationskritikalität in Fehlersituation.

Effekt	F	df ₁	df ₂	p	η ²
Konzept	1.54	1	26	.225	0.06
Zeitpunkt	1.67	1	26	.208	0.06
Konzept * Zeitpunkt	0.51	1	26	.480	0.02

3.3.4 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach Studienteil A (= Anzeige der Distanz stets korrekt) und Studienteil B (= Situation mit fehlerhafter Distanzangabe) zusammengefasst und diskutiert.

3.3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil A (reguläre Fahrt)

In der dritten Studie wurde die Unterstützung der Nutzer von hochautomatisierten Fahrzeugen bei der Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten weiter in den Studienmittelpunkt gerückt, indem das Konzept der Ankündigungen (sog. event-basierte Ankündigung) in einer empirisch validierten Ausgestaltung um eine kontinuierliche Anzeige der verbleibenden Zeit bis zur Systemgrenze erweitert wurde (sog. start-basierte Vorausschau). Zentrale Frage der Untersuchung war es, wie eine kontinuierliche Anzeige der Restdistanz im automatisierten Modus im Gegensatz zu diskreten Anzeigen, die bei einer bestimmten Distanz zur Systemgrenze ausgegeben werden, die strategische Aufgabenwahl und das Übernahmeverhalten der Probanden beeinflussen würde. Diese Studie ist eine der ersten, welche die Bedeutung der Bearbeitung von fahrfremden

Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt für die Nützlichkeit des Übernahmekonzepts in den Mittelpunkt rückt.

Insgesamt wurden drei Anzeigekonzepte miteinander verglichen. Dabei handelte es sich zum einem um eine Vorausschau, die dem Fahrer die verbleibende Distanz im automatisierten Modus bis zur nächsten Übernahme kontinuierlich anzeigte (start-basierte „Vorausschau“). Zusätzlich zur Vorausschau wurde das Konzept in Verbindung mit einer event-basierten Ankündigung („Kombination“) untersucht. Als drittes Konzept wurde eine reine event-basierte Ankündigung verwendet („Ankündigung“), wie sie in den vorherigen Studien zum Einsatz kam. Alle drei Varianten wurden von allen Studienteilnehmern erlebt (within-subject-Design). Weiterhin wurde der Zeitpunkt der Ankündigung, die im Ankündigungs- und Kombinationskonzept vorkam, experimentell als between-subjects-Faktor variiert. Die Ankündigung fand entweder *vor* oder *nach* der Aufgabenauswahl statt, so dass – wenn die Ankündigung vorher stattfand – auch in der event-basierten Bedingung die Möglichkeit bestand, die Informationen der Ankündigung über die bevorstehende Systemgrenze in die Aufgabenauswahl mit einzubeziehen.

Fahrer konnten über die Fahrt hinweg unterschiedlich lange Schreibaufgaben auswählen (kurz, mittel oder lang). Um den Anreiz für die Bearbeitung der Aufgabe zu steigern, war eine durch die Bearbeitung erreichbare Punktzahl an die Aufgabenlänge geknüpft. Während der automatisierten Fahrt konnten die Probanden sich zu definierten Streckenpunkten für die Bearbeitung der Aufgaben entscheiden. Bezüglich der letzten Aufgabe vor der Übernahme konnten nur die kurzen oder mittleren Aufgaben rechtzeitig beendet werden, wobei die kurze Aufgabe den Fahrern mehr Zeit für den anschließenden Wechsel zum manuellen Fahren lies als die mittlere Aufgabe. Bei Auswahl einer langen Aufgabe als letzte Aufgabe vor der Übernahme mussten die Probanden die Aufgabe abbrechen oder das System brach sie mit Ausgabe einer Übernahmeaufforderung ab. Beides war mit einem Punktverlust verbunden.

Die Variation des Anzeigekonzepts und die damit verbundene Möglichkeit zur Aufgabenplanung hatten den erwarteten Einfluss auf die Bearbeitung der Aufgaben. Die Fahrer passten ihre Aufgabenwahl an die ihnen zur Verfügung stehende Zeit im automatisierten Modus an, wenn ihnen das Wissen über die verbleibende Restdistanz durch die Vorausschau zur Verfügung stand. Dabei wählten sie während der automatisierten Fahrt meist lange Aufgaben, in denen die meisten Punkte gewonnen werden konnten. Bei der letzten Aufgabe vor der Übernahme wurde bei Verfügbarkeit einer start-basierten Anzeige in jedem bis auf einen Fall eine kurze oder mittlere Aufgabe gewählt, so dass die Aufgabe rechtzeitig beendet werden konnte. Die erwartete Unsicherheit bezüglich der Wahl der geeigneten Aufgabenlänge bei Fahrern der ereignis-basierten Bedingung (insbesondere bei Ausgabe der Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) zeigte sich deutlich. Schon während des automatisierten Fahrtabschnitts wurden deskriptiv häufiger mittlere oder kurze Aufgaben ausgewählt, bei der letzten Aufgabe vor der Übernahme wurde

deskriptiv häufiger eine falsche Entscheidung zu Gunsten einer langen Aufgabe getroffen als in den start-basierten Bedingungen. Nicht erwartungskonform zeigte sich auch in der ereignis-basierten Gruppe, in der die Probanden die Ankündigung *vor* der Aufgabenauswahl erhielten, eine Unsicherheit bei der Aufgabenauswahl (d. h. Auswahl kurzer oder mittlerer statt langer Aufgaben) während der automatisierten Fahrt. Bei der letzten Aufgabe war diese Fahrergruppe mit den Vorausschaubedingungen vergleichbar. Gemessen an den eingegebenen Wörtern der fahrfremden Tätigkeit während der automatisierten Fahrt war der Erfolg in den beiden Bedingungen mit reiner Ankündigung geringer als in den Bedingungen mit Vorausschau, was sich insbesondere in den langen Streckenabschnitten zeigte.

Die häufigen Fehlentscheidungen der event-basierten Ankündigung (Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) führten wahrscheinlich dazu, dass diese Gruppe die Aufgabe vor der Übernahme am längsten weiterbearbeitete (gemessen am Zeitpunkt der Aufgabenbeendigung) und damit riskierte, im entscheidenden Moment vor der Übernahme weniger aufmerksam zu sein. Somit hatten die Fahrer mit kontinuierlicher Vorausschau bei einer insgesamt höheren Aufgabenleistung mehr Zeit zur Verfügung, die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung vorzubereiten. In Bezug auf das Übernahmeverhalten konnte jedoch kein signifikanter Einfluss des Anzeigeconzepts auf den Zeitpunkt der Handerkennung, den Deaktivierungs- sowie Manöverzeitpunkt festgestellt werden. Die Hypothese, dass die Fahrer der Ankündigungsbedingung (Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) durch die vermehrte Auswahl von langen Aufgaben vor der Übernahme später übernehmen und ein Manöver ausführen, konnte nicht bestätigt werden. Dies könnte darin begründet sein, dass die erforderlichen Handlungsschritte im Anschluss an die Aufgabenbeendigung schneller durchgeführt wurden. Auch die Qualität der Übernahme sowie die selbstberichtete Situationskritikalität wurde von den verschiedenen experimentellen Bedingungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht signifikant beeinflusst.

Übereinstimmend mit den objektiven Daten berichteten die Fahrer auf subjektiver Ebene von der geringsten Nützlichkeit und Zufriedenheit in Bezug auf die Aufgabenauswahl sowie dem geringsten Komfort der Übernahme, wenn sie beim event-basierten Konzept die Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl erhielten. Wenn der Entscheidung für eine Aufgabenlänge jedoch stets eine Ankündigung vorausging, erwies sich das Ankündigungsconzept in den subjektiven Einschätzungen zur Nützlichkeit als vergleichbar mit der reinen Vorausschau. Nur die Kombination wurde noch nützlicher empfunden. Bezüglich des selbstberichteten Übernahmekomforts lagen die Werte für alle Varianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle in einem Bereich, in dem von einer komfortablen Übernahme ausgegangen werden kann. Entgegen der eingangs formulierten Hypothese, dass die Notwendigkeit der Überwachung der Restdistanz zusätzlichen Workload generieren könnte, empfanden Fahrer nicht die start-basierten Konzepte

als anstrengender, sondern vielmehr die ereignis-basierten Ankündigungsbedingung. Abschließend wurde die Kombinationsbedingung von den meisten Fahrern als das präferierte Konzept angegeben. In einigen Fällen wurde auch die reine Vorausschau bevorzugt, während kein Fahrer die alleinige Ankündigung präferierte.

3.3.4.2 Diskussion: Studienteil A (reguläre Fahrt)

Bezüglich der strategischen Wahl der Aufgabenlänge während der automatisierten Fahrt konnten die vermuteten Vorteile der start-basierten Anzeigekonzepte, die den Fahrer durch die Auswahl langer Aufgaben befähigten, die Zeit im automatisierten Modus besser zu nutzen und mehr Texteingaben zu tätigen, bestätigt werden. Entgegen der Erwartung nutzten die Probanden die ereignis-basierten Ankündigungen, wenn diese *vor* der Aufgabenauswahl präsentiert wurden, d. h. die Information über die Restdistanz in die Aufgabenwahl einbezogen werden konnte, nicht in gleichem Maße für eine strategische Aufgabenauswahl während der Fahrt. Ein möglicher Grund hierfür könnte darin bestehen, dass die Probanden im Vorfeld keine explizite Information darüber erhielten (Reinmueller, Koehler, & Steinhauser, 2018), dass die Ankündigung stets *vor* der Aufgabenauswahl erfolgen würde und erwarteten, dass sie auch in Situationen kommen würden, in denen sie erst *nach* der Aufgabenauswahl über die Übernahmenotwendigkeit informiert werden würden. Infolgedessen hatten sie möglicherweise ein zu geringes Vertrauen in das System, um den Vorteil durch die Anzeigevariante zu nutzen (Parasuraman & Riley, 1997), so dass sie nicht immer lange Aufgaben auswählten, obwohl sie rechtzeitig informiert worden wären. Insofern geben die Ergebnisse Hinweise darauf, dass beim Einsatz einer intelligenten Strategie der Präsentation von ereignis-basierten Vorinformationen (wie z. B. ein sogenannter *interruption-manager*, siehe Diskussion Studie 2) deren Funktionsweise im Vorfeld erklärt werden sollte.

Auch der Befund, dass die start-basierten Anzeigekonzepte gegenüber der ereignis-basierten Ankündigung (bei Präsentation *nach* der Aufgabenauswahl) die Wahl kurzer Aufgaben in der letzten Situation vor der Übernahme begünstigten, kann als positiver Beleg für deren Wirksamkeit in Bezug auf die geeignete Aufgabenwahl gesehen werden. Die Auswahl von mittleren Aufgaben in dieser Situation kann hingegen als Hinweis dafür gesehen werden, dass die Probanden die fahrfremde Tätigkeit gegenüber der Sicherheit der Übernahme priorisierten, was möglicherweise aus der Motivation zum Punktegewinn oder durch interindividuelle Dispositionen (bspw. Risikobereitschaft; Bromiley & Curley; Lauriola, Panno, Levin, & Lejuez, 2014) bedingt sein könnte. Die Tatsache, dass auch in den Bedingungen mit start-basierter Vorausschau vereinzelt mittlere Aufgaben ausgewählt wurden, je weiter sich die Fahrer der Systemgrenze näherten, könnte ein Hinweis auf ein Bedürfnis sein, sich vor einer bevorstehenden Übernahme nicht mehr dauerhaft mit einer fahrfremden Tätigkeit zu befassen, da eine erhöhte Beanspruchung durch die Übernahme der Fahrzeugführung vom Fahrer antizipiert wird (Metz et al., 2011;

Schömig et al., 2011). Alternativ kommen auch Ermüdungseffekte durch die Bearbeitung langer Aufgaben über einen längeren Zeitpunkt als Erklärung in Frage (Jarosch et al., 2019).

Von besonderem Interesse ist, dass die Probanden in der ereignis-basierten Bedingung bei Ausgabe der Ankündigung *nach* der Aufgabenauswahl die fahrfremde Tätigkeit am längsten weiterbearbeiteten, obwohl sie wie alle anderen Probanden zu diesem Zeitpunkt das Wissen über die Restdistanz hatten. Da bei fälschlicher Auswahl langer Aufgaben keine Punkte gesammelt werden konnten – unabhängig davon wie lange die Aufgabe weiterbearbeitet wurde, ist unklar, warum die Aufgabe nicht früher, d. h. im Moment der Ankündigung, als die Fehlentscheidung bemerkt werden konnte, abgebrochen wurde. Diesem Befund liegt möglicherweise die generelle Tendenz menschlichen Handelns zugrunde, schon begonnene zielgerichtete Handlungen abzuschließen, was durch eine Reihe motivationaler Theorien erklärt werden kann (Fox & Hoffman, 2002). Auch im Bereich des automatisierten Fahrens wurden ähnliche Tendenzen zur Weiterbearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten in Übernahmesituationen berichtet (Wandtner et al., 2018). Die vorliegende Studie legt nahe, dass solche nachteiligen Effekte (d. h. die Tendenz zur Vollendung begonnener Aufgaben) vermieden werden können, wenn zukünftige Nutzer automatisierter Fahrzeuge die Bearbeitung fahrfremder Tätigkeiten langfristig planen können, und somit durch eine vorteilige Aufgabenauswahl erst gar nicht in die Lage geraten, eine begonnene Aufgabe abbrechen zu müssen. Zukünftige Forschung sollte diesem Aspekt weitere Aufmerksamkeit widmen, um die Sicherheit von Übernahmesituationen und die Effizienz der Aufgabenbearbeitung weiter zu steigern.

Die Tatsache, dass die zusätzliche Überwachungsaufgabe durch die Kontrolle der Restdistanz keine negativen Auswirkungen auf die Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit (gemessen an der Korrekturrate) zu haben scheint, steht gängigen Ressourcenmodellen entgegen (Wickens, 2002). Dadurch, dass beide Aufgaben visuelle Aufmerksamkeitsressourcen benötigen, wäre eine gesteigerte Beanspruchung zu erwarten gewesen. Dass die Fahrer die start-basierten Konzepte nicht wie erwartet beanspruchender beurteilten als die reinen ereignis-basierten Konzepte ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass in den Bedingungen mit Vorausschau während der Fahrt fast ausschließlich lange Aufgaben bearbeitet wurden, was zu einer Steigerung der subjektiven Beanspruchung hätte führen können, da objektiv mehr Wörter geschrieben wurden. Um ein vollständigeres Bild des Einflusses der kontinuierlichen Restzeitanzeige zu erhalten, wäre eine objektive Messung zur Bestimmung des Workloads notwendig gewesen (siehe bspw. Bailey & Iqbal, 2008; Brookhuis & de Waard, 2010). Möglicherweise sind die Einschätzungen der Probanden zum empfundenen Workload auch durch andere Faktoren als der Notwendigkeit zur Überwachung der Restanzeige beeinflusst. Beispielsweise könnten die nicht vorhersehbare Unterbrechungen der Aufgabe, wie sie in der Ankündigungsbedingung (bei Präsentation der Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) erlebt wurden, als stressauslösend empfunden worden sein

(Mark, Gudith, & Klocke, 2008). Manche Studien berichten sogar von einer Steigerung der erlebten Angst durch ungeplante Unterbrechungen (Bailey et al., 2001).

Die Präferenz der Kombinationsbedingung aus Ankündigung und kontinuierlicher Anzeige der verbleibenden Distanz im automatisierten Modus kann neben der Ermöglichung einer strategischen Aufgabenauswahl auch damit in Zusammenhang stehen, dass die Entscheidung über die Rücknahme der manuellen Fahrzeugführung nicht mehr primär durch das System angestoßen wird, wie es im Falle der alleinigen Ankündigung der Fall ist, sondern stärker beim Nutzer verbleibt. Aus der Automationsforschung ist beispielsweise bekannt, dass eine solche Art der Automation (d. h. wenn relevante Entscheidungen beim Nutzer verbleiben und nicht durch die Automation getroffen werden) dabei hilft, das Situationsbewusstsein aufrecht zu erhalten (Parasuraman et al., 2000). Außerdem ist denkbar, dass die zusätzlichen Informationen über die Restdistanz im automatisierten Modus die Funktionsweise der Automation (d. h. Ausgabe einer Ankündigung bzw. Übernahmeaufforderung bei Unterschreiten einer bestimmten Distanz) besser verständlich machen, wodurch das Vertrauen in automatisierte Systeme erhöht werden kann (Lee & See, 2004).

In der vorliegenden Studie wurde die kontinuierliche Anzeige der Restdistanz gegenüber dem ereignis-basierten Konzept bevorzugt, Einflüsse auf die zeitlichen und qualitativen Komponenten der Übernahme wurden in den meisten untersuchten Variablen jedoch nicht gefunden. Dies könnte darin begründet sein, dass die ereignis-basierte Ankündigungsbedingung (Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl) zu einem optimierten Zeitpunkt (entsprechend der vorhergehenden Studie) dargeboten wurde, und somit ein geringes Potential für eine Verbesserung der Übernahmeleistung möglich war.

3.3.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse: Studienteil B (Fehlerfall)

Im zweiten Untersuchungsteil wurden die Probanden in einer separaten Fahrt während der Aufgabenbearbeitung mit einer plötzlichen Übernahme konfrontiert, da ihnen eine inakkurate Information über die Entfernung zur Systemgrenze gegeben wurde und die Systemgrenze früher als angezeigt erreicht wurde. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob Erweiterungen des HMIs im Fehlerfall sicherheitskritische Konsequenzen mit sich bringen, wenn Fahrer sich zu sehr auf die Korrektheit der Anzeige verlassen (Bahner, Elepandt, & Manzey, 2008; Kaber & Endsley, 1997; Parasuraman & Manzey, 2010). Der Konzeptvergleich fand zwischen der Vorausschau und der Ankündigungsbedingung (Ankündigung vor vs. nach Aufgabenauswahl) statt.

Bezüglich des Konzeptvergleichs wäre ein denkbarer Ausgang dieser Teilstudie gewesen, dass die Probanden in der reinen Vorausschau durch die Überwachung der Restdistanz ein höheres

Situationsbewusstsein haben und dadurch eine bessere Übernahmeleistung zeigen würden (Parasuraman et al., 2000). Jedoch konnte kein signifikanter Effekt des Anzeigeconzepts auf die Bewältigung der Fehlersituation in den Variablen der Übernahmezeit und -qualität festgestellt werden. Die Fehlersituation wurde im Mittel als „unangenehm“ bewertet und von allen Probanden ohne Kollisionen oder Spurabkommen gelöst, wobei ein Fahrer vor der Baustellenversperrung bis in den Stillstand verzögerte.

3.3.4.4 Diskussion: Studienteil B (Fehlerfall)

Das Ausbleiben sicherheitskritischer Effekte der fehlerhaften Distanzanzeigen steht im Einklang mit Forschung aus dem Bereich des manuellen Fahrens. Totzke, Volk, Naujoks und Krüger (2013) untersuchten Stauende-Warnungen beim manuellen Fahren und fanden bei fehlerhaften Distanzangaben keine Auswirkungen auf das Fahrverhalten (Bremsreaktion und Geschwindigkeitsverläufe). Dies könnte daran liegen, dass den Fahrern die restliche zur Verfügung stehende Distanz bereits handlungsrelevant erschien und sie auf die Übernahme eingestellt waren.

Außerdem könnte die Tatsache, dass die Fehlersituation während einer separaten Fahrt stattfand, nachdem die Fahrer alle Konzepte bereits erlebt hatten, bei den Fahrern die Erwartung über ein ungewöhnliches Ereignis hervorgerufen haben. Dies könnte dazu geführt haben, dass sie die Verkehrssituation stärker überwachten und deswegen die Situation frühzeitig bemerkten. Der Grund für die separate Fahrt lag darin, dass in der Fehlersituation nur zwei der drei Anzeigeconzepte miteinander verglichen werden sollten (Ankündigung vs. Vorausschau). Weil manche Fahrer aufgrund des Permutationsplans die Kombinationsbedingung als letzte Fahrt erlebten, konnte die Fehlersituation nicht am Ende der letzten Fahrt erfolgen. Um Erwartungseffekten hinsichtlich einer ungewöhnlichen Situation entgegenzusteuern, ereignete sich die Übernahmesituation schon während der Bearbeitung der zweiten ausgewählten Aufgabe, statt wie in den regulären Fahrten frühestens nach der Bearbeitung der dritten Aufgabe. Um umfassendere Aussagen zu dem untersuchten Fehlerfall treffen zu können, sollte dieser in weiteren Studien vertiefend untersucht werden.

3.3.4.5 Limitationen der Studie und Ausblick

Die konkrete Ausgestaltung der fahrfremden Tätigkeit stellt eine Einschränkung der Studie dar. Die feste Taktung der Aufgabe bedingt, dass eine Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit von den Fahrern nicht realisiert werden konnte, um bei einer falschen Aufgabenauswahl doch noch eine Beendigung vor Erreichen der Systemgrenzen zu ermöglichen. Ob eine unter Umständen aufkommende Hektik durch die schnellere Bearbeitung kurz vor der Übernahme zu

mehr Fehlern in der Aufgabe oder zu einer schlechteren Übernahmequalität führen würde, stellt einen möglichen Anknüpfungspunkt für zukünftige Studien dar.

Ein weiterer limitierender Faktor auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse besteht in der Art der Incentivierung der fahrfremden Tätigkeit. Die Motivation zur Aufgabebearbeitung war extrinsisch durch ein Punktesystem gegeben. Abgeschlossene Aufgaben erhöhten das Punktekonto, während ein Abbruch der Aufgaben zu einer Verringerung des Punktestands führte. Auf diese Weise wurde simuliert, dass die Unterbrechung von Tätigkeiten vor der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle negative Konsequenzen hat. Dies muss jedoch im Alltag nicht immer der Fall sein. Falls eine Unterbrechung keine negativen Konsequenzen hat, könnte dies zu einem anderen Übernahmeverhalten und zu anderen subjektiven Bewertungen der Übernahmekonzepte als in dieser Studie führen. Andererseits ist auch vorstellbar, dass die extrinsische Motivation zur Aufgabebearbeitung (durch Punktesystem und monetäre Belohnung) in der Realität durch manche Aufgaben übertroffen wird. So könnten Aufgaben, die aus einer intrinsischen Motivation heraus bearbeitet werden, bedingen, dass Fahrer trotz Ankündigung und Übernahmeaufforderung die Weiterbearbeitung priorisieren und die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung hinauszögern. Insofern ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf andere Arten der fahrfremden Tätigkeit, insbesondere was die Motivation zur Weiterbearbeitung angeht, in weiteren Studien zu prüfen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht zu den Effekten der Komplexität oder Schwierigkeit von Aufgaben im Hinblick auf strategische Entscheidungen. In der vorliegenden Studie unterschieden sich die Aufgaben nur in der Länge, mögliche Unterschiede in der Aufgabenschwierigkeit wurden durch die Versuchsanordnung (Abschreiben von Wörtern) und das Aufgabenmaterial (Verwendung kurzer, einfacher Wörter) zu kontrollieren versucht. Es ist denkbar, dass andere Merkmale von fahrfremden Tätigkeiten darüber entscheiden, ob Nutzer automatisierter Fahrzeuge diese in längere Phasen des automatisierten Fahrens legen werden, oder sich zutrauen, diese auch kurz vor dem Erreichen von Systemgrenzen auszuführen. Die Komplexität bzw. Schwierigkeit von fahrfremden Tätigkeiten, insbesondere in ihrer Auswirkung auf die Übernahme der manuellen Fahrzeugführung wurde bisher noch nicht umfassend untersucht. Die Untersuchung, wann „schwierigere“ Aufgaben, deren Dauer nicht abgeschätzt werden kann und wann „leichtere“ Aufgaben gewählt werden, stellt einen weiteren Ansatzpunkt für künftige Arbeiten dar. Die Schwierigkeit von Aufgaben könnte beispielsweise durch deren kognitive Beanspruchung definiert werden (siehe bspw. Mehler & Reimer, 2019). Erste Ansätze für den Vergleich unterschiedlicher Textschwierigkeiten auf die Übernahmezeit unternahmen Schartmüller et al. (2018), wobei kein signifikanter Einfluss auf die Übernahmezeit gefunden wurde. Insgesamt muss auf Basis des vorliegenden Erkenntnisstands davon ausgegangen werden,

dass die Studienergebnisse auf strukturell ähnliche fahrfremde Tätigkeiten wie der in der Studie verwendeten Anordnung beschränkt sind.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle war durch die Integration der Vorinformation auf demselben Display, auf dem auch die fahrfremde Tätigkeit ausgeführt wurde, optimiert. Wenn die Möglichkeit der Koppelung fahrrelevanter Informationen und Anzeige-Elemente der Automation nicht in einem ähnlichen Maß wie in dieser Studie besteht, und Informationen an verschiedenen Orten angezeigt werden, sind Blickwechsel zwischen den Displayorten zum Ablesen der Informationen erforderlich (siehe Wittmann et al., 2006). Es ist fraglich, ob die beobachteten positiven Effekte der Vorausschau auch dann zu beobachten sind, wenn während der automatisierten Fahrt ausgeführte fahrfremde Tätigkeiten und fahrtrelevante Informationen nicht am gleichen Anzeigeort angezeigt werden, beispielsweise durch die Verwendung von Tätigkeiten, die keine Verbindung zum Fahrzeug haben wie das Lesen von Büchern (Lapoehn et al., 2016; Wintersberger, Riemer et al., 2018).

Auch methodische Aspekte können die Generalisierbarkeit der Untersuchung einschränken. Das gewählte within-Studiendesign hat den Nachteil, dass es nach mehrmaligem Durchfahren der Strecke mit den verschiedenen Konzepten zu Lernerfahrungen bezüglich des Zeitpunkts der nächsten Übernahme gekommen sein könnte. Dies könnte im ereignis-basierten Ankündigungskonzept, bei dem die Ankündigung *nach* Aufgabenauswahl stattfand, als Hilfestellung für die Auswahl der richtigen Aufgabenlänge genutzt worden sein, so dass der nachteilige Effekt dieser Konzeptvariante durch den verwendeten Versuchsaufbau unterschätzt werden würde. Die im Streckenaufbau verwendeten unterschiedlichen Abschnittslängen der hochautomatisierten Fahrt sowie eine Permutation der Abschnittslängenreihenfolge sollten diesem Effekt entgegenwirken. Zukünftige Studien sollten versuchen, diesen Effekt zu minimieren.

Weiterer Forschungsbedarf kann darin gesehen werden, inwieweit Nutzer automatisierter Fahrzeuge noch stärker bei der Planung von Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt unterstützt werden könnten. Neben der in dieser Studie untersuchten start-basierten Vorausschau bis zur nächsten Übernahme, ist beispielsweise auch eine Übersicht über die gesamte Fahrt denkbar, die dem Fahrer von Fahrtbeginn an Informationen über alle während der Fahrt bevorstehenden Übernahmen liefert und die Bereiche angibt, in denen hochautomatisiert gefahren werden kann (Wandtner et al., 2018b).

4 Generelle Diskussion

Nutzer von hochautomatisierten Fahrzeugen (SAE L3) werden die manuelle Fahrzeugführung an Systemgrenzen, die von der Automation nicht bewältigt werden können, regelmäßig wieder selbst übernehmen müssen (SAE International, 2018). Aus der Grundlagenforschung ist bekannt, dass solche Aufgabenwechsel typischerweise mit Leistungseinbußen wie verlängerten Reaktionszeiten und erhöhten Fehlerraten einhergehen (sog. Wechselkosten; Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003; siehe Kapitel 2.1). Im Anwendungsfall des automatisierten Fahrens beinhaltet der Aufgabenwechsel zum manuellen Fahren unterschiedliche Handlungsschritte zur Unterbrechung einer möglicherweise ausgeführten fahrfremden Tätigkeit sowie zur Vorbereitung und Ausführung der Fahraufgabe (Janssen et al., 2019; siehe Kapitel 2.2). Unterschiedliche Studien in der Fahrsimulation (Dogan et al., 2017; Merat et al., 2014) und im Realverkehr (Naujoks et al., 2019) haben eine Verschlechterung der Qualität der Fahrzeugführung (z. B. der lateralen Spurhaltegüte) direkt nach dem Wechsel vom automatisierten zum manuellen Fahren gezeigt. Die Übernahmezeit schwankt zwischen den Studien und reicht laut Übersichtsarbeiten von 1 bis 15 Sekunden (Eriksson & Stanton, 2017b). Hohe Reaktionszeiten auf Übernahmeaufforderungen und Einschränkungen der Reaktionsgüte können demnach ebenfalls als Wechselkosten interpretiert werden.

Hauptziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, wie Nutzer hochautomatisierter Fahrzeuge beim Wechsel zwischen der Ausführung fahrfremder Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt und dem manuellen Fahren unterstützt werden können. Kurzfristige Übernahmeaufforderungen, wie sie in den meisten Studien dieses Forschungsfelds verwendet wurden, bieten dem Fahrer aufgrund der beschränkten zur Verfügung stehenden Reaktionszeit nur eine geringe Möglichkeit zur kognitiven und motorischen Vorbereitung des Aufgabenwechsels zum manuellen Fahren (Marberger et al., 2017). Aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion stellen sie deshalb nur eine Notlösung dar. Unterschiedliche Modelle der kognitiven Psychologie (Altmann, 2002; Altmann, 2004; Altmann & Gray, 2008; Monsell et al., 2003) und der Arbeitspsychologie (Bailey & Iqbal, 2008) versuchen Wechselkosten zu erklären und Ansätze zu liefern, diese abzuschwächen oder ganz zu vermeiden. Auf Basis theoretischer Überlegungen aus diesen Bereichen der Psychologie sollten Vorinformationen über bevorstehende Systemgrenzen die Übernahmeleistung steigern und den Komfort von Übernahmesituationen erhöhen, indem ungeplante Unterbrechungen durch kurzfristige Übernahmeaufforderungen vermieden werden und gleichzeitig die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten durch das Anzeige-konzept unterstützt wird. Während die Untersuchung des benötigten Zeitfensters zur Übernahme der Fahrzeugführung in der Vergangenheit großes

Forschungsinteresse hervorgerufen hat (siehe Review-Artikel von Eriksson & Stanton, 2017b und Zhang et al., 2019), wurden die Effekte von frühzeitigen Ankündigungen bislang weitaus seltener in Studien thematisiert (bspw. Lapoehn et al., 2016; Pampel et al., 2019; van der Heiden et al., 2017). Eine Forschungslücke besteht vor allem in der empirischen Untersuchung der konkreten Ausgestaltung solcher frühzeitigen Informationen (d. h. welche Informationen zu welchem Zeitpunkt an den Fahrer übermittelt werden sollen). Insbesondere liegen bislang kaum Arbeiten vor, die sich mit dem Einfluss der Gestaltung von Vorinformationen über bevorstehende Systemgrenzen auf die Unterbrechung und Wiederaufnahme von fahrfremden Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt beschäftigt haben.

Die Arbeit stellt deshalb die Gestaltung eines frühzeitigen Übernahmekonzepts für das hochautomatisierte Fahren, welches vor der Ausgabe von Übernahmeaufforderungen visuell-auditive Vorinformationen über Systemgrenzen präsentiert, in den Mittelpunkt. Basierend auf Forschung im Bereich der kognitiven Psychologie sowie der Arbeitspsychologie (siehe Kapitel 2) wurde eine Studienreihe durchgeführt (siehe Kapitel 3), in der unterschiedliche Gestaltungsaspekte von Vorinformationen systematisch experimentell untersucht wurden (siehe Abbildung 66). Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten somit die Möglichkeit zu überprüfen, ob sich in stärker kontrollierten Untersuchungsanordnungen im Rahmen von Grundlagenforschung gewonnene Erkenntnisse zur Verringerung von Wechselkosten auch in praktisch bedeutsamer Weise im Anwendungskontext des hochautomatisierten Fahrens zeigen.

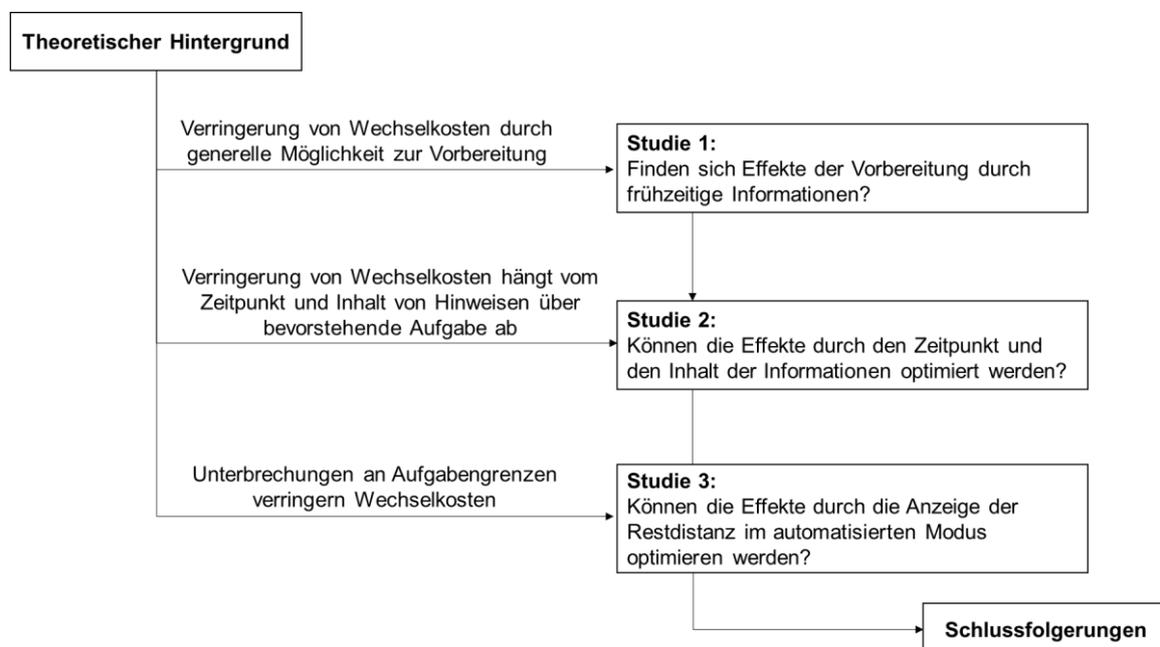


Abbildung 66: Übersicht über Studienreihe.

Alle Studien wurden in einem Fahrsimulator mit Bewegungssystem durchgeführt, um eine möglichst hohe externe Validität der Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig risikofreie und experimentell kontrollierte Bedingungen zu schaffen (Wang et al., 2010). Die Versuchsanordnung

bestand in allen Studien aus einer automatisierten Fahrt, die in unregelmäßigen Abständen durch Episoden des manuellen Fahrens unterbrochen wurde. Während der automatisierten Fahrt führten die Probanden eine fahrfremde Tätigkeit aus, bei der sie in Abhängigkeit der Bearbeitungsgüte mehr oder weniger Punkte erreichen und dadurch ihre monetäre Kompensation zur Studienteilnahme erhöhen konnten. Die Probanden wurden während der automatisierten Fahrt durch unterschiedlich gestaltete, frühzeitige und diskrete Situationsankündigungen unterstützt (Studie 1 bis Studie 3), um deren Auswirkungen auf die Unterbrechung bzw. Beendigung der fahrfremden Tätigkeit sowie die Wiederaufnahme des manuellen Fahrens zu untersuchen. Mit Ausnahme von Studie 3 stand den Probanden während der automatisierten Fahrt keine kontinuierliche Information über die Restdistanz im automatisierten Modus zur Verfügung. Im Folgenden werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Studien zusammenfassend diskutiert.

4.1 Unterstützung des Aufgabenwechsels zum manuellen Fahren

Erkenntnisse der kognitiven Psychologie können als Ausgangspunkt für eine Verringerung der nachteiligen Effekte beim Übergang zwischen dem automatisierten und dem manuellen Fahren verwendet werden (Janssen et al., 2019). Eine Vorhersage aus den Modellen des Aufgabenwechsels ist, dass eine Vergrößerung des Zeitintervalls zwischen dem Hinweis auf einen bevorstehenden Aufgabenwechsel und der Notwendigkeit der Reaktion (sog. *cue-stimulus intervall*) mit einer Verringerung der Wechselkosten einhergehen sollte (Altmann, 2004; Meiran, 1996).

Studie 1 und 2 dieser Arbeit liefern Hinweise darüber, dass kognitive Modelle des Aufgabenwechsels auf den Anwendungsfall der Übernahme der manuellen Fahrzeugkontrolle übertragen werden können. In Studie 1 führte die Einführung einer Ankündigung gegenüber einer Bedingung ohne diese (d. h. nur mit einer kurzfristigen Übernahmeaufforderung) im Einklang mit den in der kognitiven Psychologie beobachteten Effekten der Vergrößerung des Zeitfensters zwischen Hinweisreizen und Stimuli (bspw. Altmann, 2004) zu einem frühzeitigeren Kontakt der Hände mit dem Lenkrad, einer frühzeitigeren Ausführung eines erforderlichen Fahrmanövers und einer signifikanten Verbesserung der Übernahmequalität³⁹, wenn die Probanden nach der Übernahme ein Fahrmanöver ausführen mussten. Durch die Ankündigung konnten sich die Probanden mehr Zeit für die Vorbereitung des Aufgabenwechsels verschaffen. In einfacheren Situationen, in denen von den Probanden nur eine Stabilisierung der Fahrzeugkontrolle gefordert

³⁹ Gemessen anhand einer Steigerung der minimal aufgetretenen Time-to-collision in der Situation „Hindernis“.

war (siehe Gold, Naujoks et al., 2017, für eine Klassifikation von Übernahme-situationen), zeigten sich keine Vorteile in der Übernahmequalität und den zeitlichen Aspekten der Übernahme.

Dieser Unterschied in der Wirksamkeit der Vorinformationen zwischen den Versuchssituationen kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass in komplexeren Fahrsituationen (z. B. das Ausweichen vor einem Hindernis) im Gegensatz zu einfacheren Fahrsituationen (z. B. das Durchfahren eines Streckenabschnitts mit fehlenden Fahrbahnmarkierungen) in höherem Maße ein Wiederaufbau von Situationsbewusstsein (Gartenberg et al., 2014) und die Planung eines komplexen Manövers erforderlich ist. Die Stabilisierung des Fahrzeugs in der Fahrspur wird im allgemeinen als stark automatisierte Tätigkeit angesehen, die wenig kognitive Ressourcen benötigt (sog. *fähigkeits-basierte* bzw. engl. *skill-based* Tätigkeit; Rasmussen, 1980), während die Reaktion auf plötzliche Gefahrensituationen das Erkennen der Situationsmerkmale und die Aktivierung von angemessenem Verhalten beinhaltet (sog. *regel-basierte* oder *rule-based* Tätigkeit; Rasmussen, 1980). Aus der ersten Studie kann geschlossen werden, dass eine Verringerung der beschriebenen Wechselkosten durch frühzeitige Ankündigungen im Kontext des automatisierten Fahrens insbesondere dann zu erwarten sind, wenn die nach der Übernahme der Fahrzeugkontrolle zu erfüllende Fahrsituation über einfache, automatisierte Fahrtätigkeiten hinaus geht. Da komplexere Fahrsituationen in der Praxis vermutlich häufig auftreten werden (z. B. das Durchfahren von Autobahnkreuzen, Abfahren von der Autobahn bei Verlassen des Anwendungsbereichs der Automation, etc.), wird eine solche Unterstützung vermutlich eine entscheidende Rolle für die sichere und effiziente Nutzung des hochautomatisierten Fahrens spielen.

Aus den Ergebnissen der ersten Studie lassen sich jedoch noch keine Ableitungen darüber treffen, *welche* kognitiven Prozesse für eine Unterstützung der Wiederaufnahme des manuellen Fahrens entscheidend sind. Für die Entstehung von Wechselkosten werden in der Grundlagenforschung unterschiedliche Ursachen diskutiert. Einerseits werden kognitive Prozesse der aufgabenspezifischen Vorbereitung in Form des Wechsels des Aufgaben-Sets angeführt (bspw. das Setzen neuer Aufgabenziele, die Aktivierung von Stimulus-Reaktions-Assoziationen oder die aufmerksamkeitsbezogene Gewichtung von aufgabenrelevanten Stimuli; siehe Kiesel et al., 2010). Andere Modelle erklären die Verschlechterung der Leistung nach einem Aufgabenwechsel stattdessen mit einer Interferenz von Gedächtnisprozessen der vorherigen und nachfolgenden Aufgabe (Altmann & Gray, 2008; Koch, 2005; Mayr & Kliegl, 2003). Da der Zeitpunkt der Ankündigung und deren Spezifität in der ersten Studie nicht variiert wurde, können aus den Ergebnissen keine differenzierenden Aussagen zu den dahinterliegenden kognitiven Prozessen abgeleitet werden. Während die aufgabenspezifische Vorbereitung (d. h. der Wechsel des Aufgaben-Sets für die anstehende Fahrtätigkeit; Monsell, 2003; Rogers & Monsell, 1995) vor allem dadurch beeinflusst sein sollte, inwieweit der Fahrer vor dem Aufgabenwechsel durch

spezifische Informationen über das auszuführende Fahrmanöver unterstützt wird, sollte die Verringerung der Interferenz durch die vorherige Aufgabe primär durch die verstrichene Zeit (und den damit verbundenen Verfall von Gedächtnisspuren des vorherigen Aufgaben-Sets) zwischen der Beendigung der vorherigen Tätigkeit und der Wiederaufnahme der Fahraufgabe bestimmt werden (Allport und Wylie, 1999; Altmann, 2002).

Im Rahmen der zweiten Studie wurden sowohl der Zeitpunkt als auch die Spezifität der Ankündigung (d. h. Anzeige vs. keine Anzeige des erforderlichen Manövers in der Vorinformation) variiert. Auf diese Weise können Rückschlüsse darüber getroffen werden, inwieweit eine alleinige Vergrößerung des Zeitfensters zwischen der Präsentation der Vorinformation und der Notwendigkeit der Wiederaufnahme der Fahraufgabe ausreichend ist oder eine aufgabenspezifische Vorbereitung des Aufgabenwechsels (durch die Spezifität der Vorinformation) für eine Senkung der Wechselkosten bei der Kontrollübernahme notwendig ist. Der Zeitpunkt der Ankündigung beeinflusste in dieser Studie die meisten zeitlichen Aspekte der Übernahme, die mit der Vorbereitung der Rücknahme der Fahrzeugführung verbunden sind. Bei größerem zur Verfügung stehenden Zeitfenster pausierten die Probanden die fahrfremde Tätigkeit früher, nahmen die Hände früher ans Lenkrad und deaktivierten die Automation frühzeitiger, während die Spezifität der Vorinformation diese Variablen nicht signifikant beeinflusste. Die Reaktion auf das nach der Übernahme bevorstehende Verkehrsereignis wurde hingegen vorwiegend durch die Spezifität der Vorinformation beeinflusst. Bei spezifischer Ankündigung (d. h. Hinweis über auszuführendes Fahrmanöver) führten die Probanden einen notwendigen Fahrstreifenwechsel früher aus als bei unspezifischer Vorinformation. Der Zeitpunkt der Vorinformation spielte hierbei insofern eine Rolle, als dass bei frühzeitiger Ankündigung (1000 m-Ankündigung vs. 500 m-Ankündigung) eine noch frühere Manöverausführung begünstigt wurde.

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse aus den ersten beiden Studien darauf schließen, dass die Unterstützung der kognitiven Re-Konfiguration des Aufgaben-Sets durch spezifische Vorinformationen zu komplexen Fahraufgaben, die unmittelbar nach der Übernahme ausgeführt werden müssen, für die Effektivität der Vorinformationen eine größere Rolle spielt als die alleinige Vergrößerung des Zeitfensters zwischen der Präsentation der Vorinformation und der Notwendigkeit des Aufgabenwechsels. Eine theoretische Erklärung hierfür könnte darin bestehen, dass durch die Präsentation der Vorinformation zunächst eine *endogene* Re-Konfiguration des Aufgaben-Sets stattfindet (d. h. ohne die Notwendigkeit eines externen Stimulus, beispielsweise wenn die Fahrsituation noch nicht sichtbar ist), die Re-Konfiguration jedoch erst durch eine weitere *exogene* Komponente (d. h. durch die Wahrnehmung eines Stimulus und Aktivierung der damit assoziierten Reaktionen) mit dem Erscheinen der Fahrsituation abgeschlossen werden kann (siehe Rogers & Monsell, 1995). Die spätere *exogene* Re-Konfiguration könnte durch Priming der

erforderlichen Reaktion – indem diese in der Vorinformation explizit präsentiert wurde – erleichtert worden sein (Yeung & Monsell, 2003), wodurch die Probanden letztlich frühzeitiger reagierten, als wenn diese Information nicht im Vorfeld angezeigt wurde. Der Effekt des Präsentationszeitpunkts der Vorinformationen spricht dafür, dass der Priming-Effekt des erforderlichen Manövers durch eine zeitliche Optimierung noch gesteigert werden kann. Dies kann durch die in der Literatur beschriebenen Effekte des Verfalls des vor dem Aufgabenwechsel aktiven Aufgaben-Sets (d. h. stärkerer Effekt der Interferenz bei kleinerem Zeitfenster zwischen Beendigung der vorherigen Aufgabe und Reaktion auf die Fahrsituation) erklärt werden (siehe Allport & Wylie, 1999; Altmann, 2002; Kiesel et al., 2010). Eine derartige Interpretation der Ergebnisse würde folglich auf einen zweistufigen Prozess des Wechsels vom automatisierten zum manuellen Fahren schließen lassen: (1) die Wiederherstellung der Übernahmebereitschaft, welche durch die zeitlich optimierte Präsentation unspezifischer Vorinformationen unterstützt werden kann und (2) die Ausführung einer erforderlichen Reaktion auf die sich der Übernahme anschließende Fahrsituation, welche vor allem durch die Darbietung spezifischer, die Reaktionsselektion erleichternde, Hinweise gefördert werden kann.

4.2 Unterstützung der Unterbrechung von fahrfremden Tätigkeiten

Die Möglichkeit zur Bearbeitung von fahrfremden Tätigkeiten kann für die Akzeptanz des automatisierten Fahrens eine wichtige Rolle spielen (Naujoks, Wiedemann et al., 2017). Dies wirft die Frage auf, wie Fahrer bei bevorstehenden Systemgrenzen gleichzeitig auf die kommende Fahraufgabe vorbereitet werden können und negative Auswirkungen auf die Aufgabenausführung minimiert werden können. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit neben der Untersuchung unterschiedlicher Gestaltungsaspekte von Vorinformationen zur Unterstützung des Aufgabenwechsels vom automatisierten zum manuellen Fahren auch die Wechselwirkung des Umgangs mit während der Fahrt ausgeführten fahrfremden Tätigkeiten und der Wirksamkeit von Vorinformationen analysiert.

Einen theoretischen Zugang für geeignete Unterstützungsmöglichkeiten bietet die Forschung zu Unterbrechungen von Tätigkeiten im Arbeitskontext sowie der Mensch-Computer-Interaktion. Beispielsweise können selbst-initiierte Aufgabenwechsel im Vergleich zu fremd-initiierten Aufgabenwechseln Wechselkosten verringern (Arrington & Logan, 2005). Probanden, die selbst wählen können, wann sie eine Aufgabe im Kontext von Büroarbeit unterbrechen, zögern Unterbrechungen bis zu Momenten mit geringerem Workload hinaus (Salvucci & Bogunovich, 2010). Grenzen von Teilaufgaben stellen in der Regel Situationen mit geringem Workload dar, weswegen sich diese besonders für eine Unterbrechung eignen (Bailey & Iqbal, 2008). Dass

Fahrer Nebenaufgaben typischerweise bis zum Ende einer Teilaufgabe weiter bearbeiten, wurde bereits beim manuellen Fahren berichtet (Brumby et al., 2009; Janssen et al., 2012).

Einen ersten Ansatzpunkt für die Unterstützung der Aufgabenbearbeitung bei unvermeidlichen Unterbrechungen durch Systemgrenzen stellt die Ermöglichung taktischer Entscheidungen, d. h. die selbstregulierte Unterbrechung (siehe Abbildung 67) einer bereits begonnenen Aufgabe im Vorfeld einer Systemgrenze dar. Für einen situationsadaptiven Umgang mit der Aufgabe, wie er beim manuellen Fahren beobachtet wurde (siehe bspw. Metz et al., 2011; Morgenstern, Naujoks, Krems, & Keinath, 2018; Schömig et al., 2011), müssen Informationen über die Verkehrssituation über die Mensch-Maschine-Schnittstelle vermittelt werden, da Nutzer automatisierter Fahrzeuge nicht mehr kontinuierlich in die Fahraufgabe involviert sind.

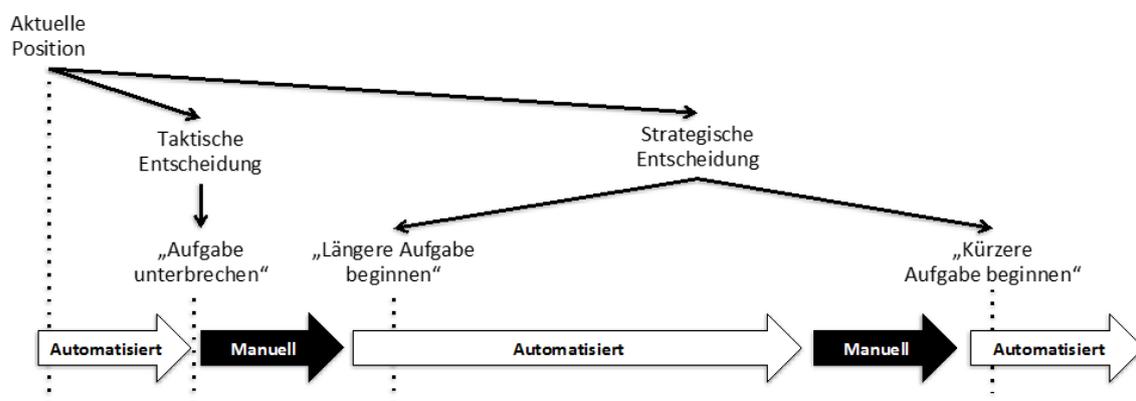


Abbildung 67: Taktische und strategische Entscheidungen zur Unterstützung der Aufgabenbearbeitung.

In der zweiten Studie wurden deshalb die Auswirkungen der in dieser Arbeit untersuchten diskreten Vorinformationen auf den selbstregulierten, taktischen Umgang mit der fahrfremden Tätigkeit in Annäherung an Systemgrenzen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Fahrer die von der Mensch-Maschine-Schnittstelle bereitgestellten Informationen für ihre taktischen Entscheidungen zur Unterbrechung der während der automatisierten Fahrt begonnenen Aufgaben nutzen und diese rechtzeitig unterbrechen, wenn die Vorinformationen mit einem ausreichenden Zeitbudget präsentiert werden. Die Studie zeigt jedoch auch, dass eine beliebige Vergrößerung des Zeitfensters nicht automatisch zu einer weiteren Verbesserung dieses Aspekts des Wechsels zur manuellen Fahrt führt. Der Abstand zur Systemgrenze, bei dem die Tätigkeit pausiert wurde, war beim kürzesten Informationszeitpunkt (500 m) am geringsten, unterschied sich zwischen dem mittleren (1000 m) und dem größten Präsentationszeitpunkt (2000 m) jedoch nicht signifikant. Somit war das resultierende Zeitfenster zwischen dem Pausieren der fahrfremden Tätigkeit und dem Erreichen der Systemgrenze, innerhalb dessen die kognitiv-motorische Re-Konfiguration der Fahraufgabe stattfinden konnte, zwischen den beiden frühzeitigeren Bedingungen vergleichbar. Bei der 500 m-Bedingung musste die Re-Konfiguration hingegen in einem kürzeren Zeitfenster erfolgen, was eine Ursache dafür sein könnte, dass die spezifischen Vorinformationen in der 500

m-Bedingung weniger effektiv waren. Dass die Probanden in der 2000 m-Bedingung trotz großem zur Verfügung stehenden Zeitfenster die Aufgabe nicht früher unterbrachen, kann dadurch erklärt werden, dass bereits die 1000 m-Ankündigungsbedingung genügend Zeit für die Vorbereitung des Aufgabenwechsels bot. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass Fahrer fahrfremde Tätigkeiten infolge der Präsentation frühzeitiger Informationen über bevorstehende Systemgrenzen nicht automatisch sofort unterbrechen werden, sondern diese möglicherweise bis an selbstgewählte Unterbrechungspunkte weiterbearbeiten werden.

Dass die Weiterarbeit bis an die Grenzen von Teilaufgaben jedoch auch sicherheitsrelevante Konsequenzen haben kann, wenn daraus ein zu geringer Abstand zur Systemgrenze resultiert (Wandtner, 2018), wirft die Frage auf, wie die selbstregulierte Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit noch weiter unterstützt werden kann. Die taktische Unterbrechung der Aufgabe stellt dabei nur einen Aspekt des Umgangs mit fahrfremden Tätigkeiten beim hochautomatisierten Fahren dar. Idealerweise findet eine vollständige Beendigung – im Unterschied zur bloßen Unterbrechung – der vor der Übernahme ausgeführten Aufgabe statt, so dass Fahrer während der Ausführung der Fahraufgabe keine nicht-fahrtrelevanten Informationen im Gedächtnis halten müssen, die sich negativ auf die Fahraufgabe selbst sowie die Fortführung der fahrfremden Tätigkeit nach deren Unterbrechung auswirken können (siehe Abbildung 67). Damit dies möglich ist, müssen während der automatisierten Fahrt vermutlich solche Aufgaben durch die Nutzer initiiert werden, die beim Erreichen von Systemgrenzen auch tatsächlich beendet werden können.

Der Aspekt der strategischen Auswahl von fahrfremden Tätigkeiten während des automatisierten Fahrtabschnitts wurde deshalb in der dritten Studie betrachtet. Einerseits wurde den Probanden eine kontinuierliche Anzeige der verbleibenden Restdistanz im automatisierten Modus präsentiert (siehe auch Holländer & Pflöging, 2018; Lapoehn et al., 2016), andererseits wurde ihnen die diskrete Vorinformation kurz *vor* der Auswahl unterschiedlich langer Aufgaben dargeboten. In der Vergleichsbedingung, in der die Probanden die diskrete Vorinformation wie in den ersten beiden Studien nicht in die Aufgabenauswahl mit einbeziehen konnten, wurden kurz vor der Übernahme häufiger lange Aufgaben ausgewählt. Da lange Aufgaben nicht rechtzeitig vor der Übernahme beendet werden konnten, mussten diese aktiv abgebrochen werden, was mit einem Punktverlust verbunden war. Außerdem wurde die Aufgabe vor der Übernahme länger weiterbearbeitet, als wenn den Probanden die Information über die verbleibende Restdistanz kontinuierlich oder kurz *vor* der Aufgabenauswahl bereitgestellt wurde. Demensprechend können durch die Möglichkeit zur strategischen Aufgabenplanung (d. h. Auswahl von Aufgaben, die rechtzeitig und vollständig vor der manuellen Kontrollübernahme beendet werden können) eine Tendenz zur Weiterbearbeitung bereits begonnener Aufgaben und damit verbundene, potentiell sicherheitskritische Konsequenzen (Fox & Hoffman, 2002; Wandtner, 2018; siehe auch Studie 2) verhindert werden.

Im Vergleich zu den in den ersten beiden Studien untersuchten – und in der Forschung zu Übernahmeaufforderungen fast ausschließlich verwendeten – diskreten Übernahmeaufforderungen bzw. Vorinformationen hatte die kontinuierliche Darstellung der verbleibenden Restdistanz außerdem den Vorteil, dass die Probanden ihren Erfolg in der fahrfremden Tätigkeit maximieren konnten. Dies war möglich, da während der unterbrechungsfreien automatisierten Fahrt häufiger lange Aufgaben mit einem größeren Punktegewinn gewählt und beendet wurden. Die Ergebnisse machen somit deutlich, dass die Effektivität von Vorinformationen im Anwendungsfall des automatisierten Fahrens auch davon abhängen kann, ob Nutzer sich durch das Anzeige-konzept die Bedingungen für eine frühzeitige und vollständige Beendigung von während der Fahrt ausgeführten fahrfremden Tätigkeiten schaffen können.

Zusammenfassend zeigen die beiden vorangegangenen Kapitel, dass wesentliche Elemente der Erklärungsmodelle von Aufgabenwechseln zwischen verschiedenen Tätigkeiten (siehe Kapitel 4.1) sowie Unterbrechungen von Tätigkeiten (siehe Kapitel 4.2) erfolgreich auf die Gestaltung der Unterstützung beim Wechsel zwischen dem automatisierten und dem manuellen Fahren angewendet werden konnten (siehe auch Janssen et al., 2019; Naujoks, Wiedemann et al., 2017). Bezogen auf die diskrete Vorinformation scheint es ein ideales Zeitfenster für eine Vorbereitung des Wechsels des Aufgaben-Sets für die kommende Fahraufgabe zu geben. Eine Verringerung der Interferenz mit der zuvor ausgeführten fahrfremden Tätigkeit alleine ist jedoch vermutlich als Erklärung für die Effekte der Vorinformation in Bezug auf die Steigerung der Übernahmequalität nicht hinreichend, da dadurch nicht erklärt werden kann, warum Fahrer komplexe Manöver bei spezifischen Vorinformationen frühzeitiger ausführen. Die Unterstützung des Wechsels des Aufgaben-Sets durch die Darbietung spezifischer Vorinformationen über auszuführende Fahrmanöver scheint auf Basis der vorliegenden Studienergebnisse bedeutsamer zu sein.

Die Studien machen weiterhin deutlich, dass eine durch Vorinformationen ergänzte und optimierte Übernahmeaufforderung alleine aus Nutzersicht noch keine zufriedenstellende Lösung darstellt. Vielmehr sollte Nutzern automatisierter Fahrzeuge die Möglichkeit gegeben werden, die Involviertheit in fahrfremde Tätigkeiten selbst steuern zu können, so dass diese bei Auftreten einer Systemgrenze zeitnah unterbrochen bzw. beendet werden können. Studie 2 und 3 machen hierbei deutlich, dass eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle Nutzer automatisierter Fahrzeuge effektiv bei ihren taktischen und strategischen Entscheidungen unterstützen kann, wozu sie ohne die entsprechenden Vorinformationen nicht in der Lage wären. Im Hinblick auf die Forschung zu Transitionen vom automatisierten zum manuellen Fahren bedeutet dies, dass eine alleinige Fokussierung auf die Untersuchung der Effekte von Übernahmeaufforderung für die Beschreibung und Erklärung einer sicheren und effizienten Übernahme der Fahrzeugführung

nicht ausreichend ist und stattdessen die vorherige Phase des automatisierten Fahrens in die Untersuchungen mit einbezogen werden sollte (siehe auch Naujoks, Wiedemann et al., 2017).

4.3 Auswirkungen von Ankündigungen auf Automationsvertrauen

Die Automation von zuvor durch Menschen ausgeführten Tätigkeiten sowie der Umgang mit Automation stellt seit langer Zeit ein aktives Forschungsfeld dar (bspw. Bainbridge, 1983; Fitts et al., 1951; Mackworth, 1948). Grund hierfür sind verschiedene negative Auswirkungen, die mit der Nutzung von Automation einhergehen können. So kann ein zu starkes Vertrauen auf die Automation beispielsweise zu einer Vernachlässigung deren Überwachung durch den menschlichen Nutzer führen (Parasuraman & Riley, 1997). Wenn der Nutzer nur noch an wenigen Aspekten der Aufgabe beteiligt ist, kann es außerdem zu einem Verlust der Fähigkeiten durch fehlende Übung (Stanton & Marsden, 1996), einem Verlust des Situationsbewusstseins (Endsley, 1999) oder einer generellen Unterforderung durch resultierende Monotonie (Thackray, 1981) kommen (siehe Kapitel 2.4). Das hochautomatisierte Fahren birgt insofern die Gefahr, dass Nutzer Sondersituationen, an denen die Automation an ihre Grenzen stößt, weniger gut lösen können. Eine Erweiterung des Übernahmekonzepts durch die Darbietung frühzeitiger Informationen (im Gegensatz zu Übernahmeaufforderungen kurz vor dem Erreichen der Systemgrenze) stellt aus theoretischer Sicht eine Steigerung der Fähigkeiten der Automation dar. Diese sollte mit einem größeren Vertrauen in die Automation einhergehen (Lee & See, 2004), welches zu einer weiteren Abnahme der Überwachung der Automation durch den Nutzer sowie dessen Reaktionsbereitschaft führen kann (Bahner et al., 2008; Onnasch et al., 2014). Dies könnte in Grenzfällen, in denen keine frühzeitige Prädiktion von Systemgrenzen möglich ist, zu einer Verschlechterung der Übernahmeleistung führen.

Während im Bereich der Fahrerassistenz die Abschätzung der Beherrschbarkeit von Systemfehlern traditionell eine große Rolle spielt (RESPONSE Consortium, 2006), liegen im Bereich des hochautomatisierten Fahrens bislang kaum Studien vor, die sich mit Systemfehlern oder Systemausfällen beschäftigen (im Gegensatz zur Untersuchung der Reaktion auf korrekte Übernahmeaufforderungen). Um eine Abschätzung negativer Effekte des erweiterten Übernahmekonzepts treffen zu können, wurden Prädiktionsfehler durch die Automation und damit einhergehende fehlende oder fehlerhafte Ausgaben der Mensch-Maschine-Schnittstelle in unterschiedlichen Ausprägungen in die Studien dieser Arbeit integriert (Studie 1: stiller Systemfehler; Studie 2: ausbleibende Ankündigung; Studie 3: fehlerhafte Vorinformation).

Die größten negativen Auswirkungen auf die Übernahmeleistung zeigten sich in der ersten Studie, in der ein **stiller Systemausfall** der Automation untersucht wurde. Hierbei mussten die

Probanden ohne einen Hinweis selbst-initiiert in die Situation eingreifen und einem Hindernis ausweichen. Im Gegensatz zu einer durch eine Vorinformation oder Übernahmeaufforderung angezeigten Unterbrechungsnotwendigkeit stellt dieser Eingriff eine Selbstunterbrechung (engl. *self-interruption*; Adler & Benbunan-Fich, 2013) der automatisierten Fahrt dar. Derartige Situationen werden normalerweise häufig beim teilautomatisierten Fahren diskutiert, da Nutzer hier stets bereit sein müssen, auf Systemausfälle zu reagieren (Louw et al., 2019; Naujoks et al., 2018; Strand et al., 2014; Victor et al., 2018). Erhielten die Probanden bei fehlerfreier Funktion der Automation stets eine frühzeitige Ankündigung, nahmen sie die Hände später ans Lenkrad und die Situation entwickelte sich gemessen an der minimalen *Time-to-collision* kritischer, als wenn sie in der vorherigen Fahrt immer nur von kurzfristigen Übernahmeaufforderungen unterstützt wurden. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass auch eine relativ geringe Änderung des Übernahmekonzepts (in Form einer zusätzlichen Ankündigung) zu einem verstärkten Automationsvertrauen (im Sinne eines *sich Verlassens* auf die Automation, engl. *reliance*) führen kann, woraus sich negative Konsequenzen auf die Übernahmeleistung bei stillen Systemausfällen ergeben können (Larsson et al., 2014; Victor et al., 2018).

Dieses Ergebnis stützt die Annahme, dass die Steigerung der Unterstützung bei regulären Übernahme-situationen zu den vermuteten negativen Konsequenzen in Situationen, in denen Systemgrenzen nicht erkannt werden, führen kann. Der Grund, warum dieser Aspekt bislang nicht untersucht wurde, ist vor allem darin zu sehen, dass hochautomatisiertes Fahren laut Definition (SAE International, 2018) in solchen Situationen keine unaufgeforderte Fahrerreaktion vorsieht. Trotzdem ist auf Basis der Studienergebnisse zu erwarten, dass Fahrer auch in solchen Situationen (stille Systemausfälle beim hochautomatisierten Fahren) versuchen werden, in die Situation einzugreifen. Im Hinblick auf die Automationsforschung stellen die Ergebnisse infrage, inwieweit aktuell verwendete Klassifikationen (z. B. SAE) automatisierter Systeme den psychologischen Konsequenzen der Automationsgestaltung für die Reaktionsbereitschaft von Nutzern gerecht werden. So unterscheiden sich die beiden untersuchten Systeme („Ankündigung und Übernahmeaufforderung“ und „Übernahmeaufforderung ohne Ankündigung“) nicht auf der aktuell international verwendeten fünfstufigen Automationskala der Society of Automotive Engineers (SAE, 2018). Die im Bereich der Ingenieurspsychologie häufig verwendeten Modelle, die Automation danach unterteilen, welche Phase der Informationsverarbeitung (d. h. *Informationsaufnahme*, *Informationsanalyse*, *Handlungsselektion*, *Handlungsausführung*, siehe Parasuraman et al., 2000) automatisiert wird, würden eine solche Differenzierung der beiden Ausprägungen des Übernahmekonzepts ermöglichen. Spezifische Informationen über das nach der manuellen Kontrollübernahme auszuführende Manöver können zusätzlich die Handlungsselektion unterstützen.

In der zweiten und dritten Studie wurden **ausbleibende** bzw. **fehlerhafte Vorinformationen** untersucht. In Studie 2 mussten die Probanden auf eine kurzfristige Übernahmeaufforderung reagieren, ohne dass dieser wie gewohnt eine Vorinformation vorausging. In der dritten Studie wurde ein Prädiktionsfehler der verbleibenden Distanz bis zur Systemgrenze untersucht, indem diese deutlich früher als angegeben erreicht wurde. In beiden Fällen handelte es sich also um eine durch die Automation initiierte Unterbrechung, deren Ankündigung entweder fehlte oder nicht dem gewohnten Zeitpunkt entsprach. In der zweiten Studie hatte das während der vorangegangenen Fahrt erlebte Zeitfenster der Vorinformation keinen signifikanten Einfluss auf die Reaktion der Probanden auf die späte Übernahmeaufforderung. In der dritten Studie hatte die Art der Unterstützung (kontinuierliche Vorausschau vs. ereignis-basierte Ankündigung) ebenfalls keinen signifikanten Effekt auf die Fahrerreaktion bei fehlerhaften Distanzangaben. Die Ergebnisse sprechen somit dafür, dass die Reaktionsbereitschaft von Nutzern hochautomatisierter Fahrzeuge zur Kompensation der ausbleibenden bzw. fehlerhaften Vorinformationen ausreichend ist, wenn mindestens eine kurzfristige Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass das Überwachungsverhalten für eine Kompensation der Fehler angemessen war. In der ersten Studie wurde beispielsweise beobachtet, dass eine unerwartet ausbleibende Ankündigung verglichen mit der Experimentalbedingung, in der die kurzfristige Übernahmeaufforderung ausblieb, zwar zu einer späteren Entscheidung über einen manuellen Eingriff führte (siehe Victor et al., 2018), sich jedoch nicht auf das Überwachungsverhalten der Nutzer niederschlug. Es muss jedoch auch darauf hingewiesen werden, dass die Situation nach Ausbleiben der frühzeitigen Ankündigung in Studie 2 von den Probanden selbst als „gefährlich“ eingeschätzt wurde und bei einigen Probanden zum Abbremsen in den Stillstand führte.

Die Untersuchung von Systemfehlern wurde durchgeführt, um die Entscheidung darüber, ob eine Erweiterung von Übernahmekonzepten sinnvoll ist, nicht nur von deren positiven Auswirkungen auf die Übernahmeleistung bei korrektem Systemverhalten (d. h., wenn Situationen korrekt prädiziert werden) abhängig zu machen. Auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit scheinen sich Prädiktionsfehler vor allem dann negativ auf die Übernahmeleistung auszuwirken, wenn Verkehrsereignisse durch die Automation nicht erkannt werden und dies ein stilles Systemversagen nach sich zieht. Ausbleibende bzw. fehlerhafte Ankündigungen zogen in den Fahrsimulationstudien hingegen keine bedeutsamen, sicherheitsrelevanten Konsequenzen nach sich, solange noch eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wurde. Bezüglich der Auswirkungen von Fehlerfällen kann die vorliegende Arbeit jedoch nur als erster Schritt angesehen werden. Wie bereits in den einzelnen Kapiteln diskutiert, haben die Studien aufgrund des explorativen Charakters methodische Einschränkungen (z. B. das Fehlen einer Kontrollgruppe in Studie 2 und 3), so dass zukünftige Forschung die Auswirkungen von Fehlerfällen systematisch und in größerem Umfang untersuchen sollte.

4.4 Generelle Limitationen

In diesem Kapitel werden generelle Limitationen der durchgeführten Studien zusammenfassend diskutiert. Studienspezifische Limitationen wurden bereits in den jeweiligen Diskussionskapiteln der Einzelstudien aufgeführt.

Während eine Neuartigkeit der Studien darin besteht, dass der Unterbrechung bzw. Beendigung der fahrfremden Tätigkeiten sowohl im Studiendesign als auch in den betrachteten abhängigen Variablen eine zentrale Rolle zugesprochen wurde, stellen die verwendeten Tätigkeiten auch eine mögliche Beschränkung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse dar. Obwohl die in der zweiten und dritten Studie verwendete Aufgabe einen deutlich höheren Realitätsgrad als die der ersten Studie aufweist, wurden einige Aspekte der Ausführung weiterhin experimentell kontrolliert, was die Alltagsnähe der Aufgaben einschränkt. Beispielsweise hatten die Probanden durch das zeitlich konstant gehaltene Erscheinen der einzelnen Wörter nicht die Möglichkeit, die Aufgaben durch eine Erhöhung der Tippgeschwindigkeit maßgeblich schneller zu bearbeiten. Außerdem handelte es sich bei allen verwendeten Aufgaben dieser Arbeit immer um visuell-manuelle Tätigkeiten. Inwieweit sich die Ergebnisse zu den Auswirkungen des erweiterten Übernahmekonzepts auch auf andere Aufgabenmodalitäten übertragen lassen, bleibt vorerst unklar (siehe bspw. Wandtner, 2018; Wandtner et al., 2018a). Es ist denkbar, dass etwa eine rein auditive Tätigkeit (z. B. Hörbuch hören) weniger beanspruchend ist und deutlich später oder gar nicht vor der manuellen Kontrollübernahme unterbrochen wird. Ein Ansatzpunkt für zukünftige Studien ist die Untersuchung, wie sich die Auswahl bzw. Planung von Tätigkeiten (wie in Studie 3) gestaltet, wenn die Probanden zwischen Aufgaben unterschiedlicher Modalität wählen können, die mehr oder weniger mit dem manuellen Fahren interferieren (Spiessl & Hussmann, 2011).

Eine weitere generelle Limitation der Studien bezieht sich auf die Verwendung des Fahrsimulators als Versuchsumgebung. Alle Untersuchungen wurden in einem Fahrimulator mit Bewegungssystem durchgeführt. Das Mockup bestand in allen Studien aus einem realen Fahrzeug mit dem zugehörigen Fahrzeuginnenraum, wie beispielsweise Pedalerie, Kombiinstrumentendisplay und Multifunktionslenkrad. Neben der Erreichung einer ausreichenden *Präsenz* (d. h. dem Eindruck, sich in der virtuellen Welt zu befinden; siehe bspw. Deniaud, Honnet, Jeanne, & Mestre, 2015) stellt sich bei der Verwendung von virtuellen Versuchsumgebungen insbesondere die Frage, ob die Gefahren- bzw. Risikowahrnehmung der Probanden in der simulierten Fahrumgebung mit der Realität vergleichbar ist und die Ergebnisse in Bezug auf den Umgang mit der fahrfremden Tätigkeit und den simulierten Systemgrenzen (z. B. eine Spurblockierung durch eine Baustelle) übertragbar sind. Mittlerweile liegt eine Reihe von vergleichenden Studien (auch mit dem in dieser Arbeit verwendeten Fahrimulator) vor, welche die Reaktion auf plötzliche Verkehrsereignisse oder die Wahrnehmung der Kritikalität von

Verkehrereignissen von Fahrsimulator und Realfahrzeug verglichen (Lee, 2003; Purucker, Schneider, Rüger, & Frey, 2018; Purucker, Rüger, Schneider, Neukum, & Färber, 2014; Yan, Abdel-Aty, Radwan, Wang, & Chilakapati, 2008). Die Studien weisen im Allgemeinen auf eine relative Validität der Studienergebnisse hin. Dies bedeutet, dass Effekte der experimentellen Faktoren in der Regel auch in der realen Fahrsituation gefunden werden, jedoch nicht von einer Übertragbarkeit der absoluten Werte ausgegangen werden sollte. Für den Anwendungsfall des automatisierten Fahrens liegen bislang allerdings nur relativ wenige Studien vor, die mit realen Fahrzeugen im alltäglichen Straßenverkehr durchgeführt wurden (bspw. Naujoks et al., 2019), so dass sich die Frage der Validität der in der Fahrsimulation entstandenen Ergebnisse erst in Zukunft bewerten lassen wird.

Eine Einschränkung bei der Versuchsanordnung stellt außerdem die Dauer der automatisierten Fahrtabschnitte bzw. die Anzahl der erlebten Systemgrenzen innerhalb der Versuchsfahrten dar. Gerade während der Einführungsphase des hochautomatisierten Fahrens ist es denkbar, dass die Möglichkeit zur Aktivierung der Automation und der Abwendung vom Verkehrsgeschehen nur für wesentlich kürzere Zeitspannen als die in dieser Studie verwendeten besteht. Mit zunehmendem Fortschritt der Technik ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Automation über einen längeren Zeitraum ohne die Notwendigkeit zur manuellen Kontrollübernahme genutzt werden kann. In diesem Fall muss allerdings mit Mudigkeitseffekten gerechnet werden, wenn während der Fahrt keine ansprechenden oder aktivierenden Tätigkeiten zur Verfügung stehen (Jarosch et al., 2019; Naujoks et al., 2018). Beide Szenarien stellen die Übertragbarkeit der Ergebnisse infrage und bieten gleichzeitig Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung.

Weiterhin ist die Instruktion der Probanden als Einschränkung zu nennen. In jeder Studie fand eine ausführliche Aufklärung über den bestimmungsgemäßen Gebrauch hochautomatisierter Fahrfunktionen (d. h. Erklärung der Rolle des Fahrers und der Automation, Aufklärung über Systemgrenzen) sowie eine ausführliche Übungsfahrt statt. In der Übungsfahrt erlebten die Probanden die Systemgrenzen sowie das Anzeige-Bedien-Konzept und konnten bei Unklarheiten Rückfragen stellen, um Missverständnisse in Bezug auf die Rolle des Fahrers und die Benutzung der Automation zu vermeiden. Während dadurch die interne Validität der Studienergebnisse (durch die Minimierung der Einflüsse von Vorwissen und Übung im Umgang mit der Automation) gesteigert werden sollte, sind die Ergebnisse der Studien unter Umständen nicht auf Situationen übertragbar, in denen derartige Automationssysteme erstmalig verwendet werden und Fahrer mit der Nutzung noch nicht ausreichend vertraut sind (Forster, Hergeth, Naujoks, Beggiato et al., 2019; Forster, Hergeth, Naujoks, Krems et al., 2019). Weiterhin beinhaltete die Instruktion auch Aspekte zur Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit. Insbesondere das eingeführte Belohnungssystem sollte zu einer Unterbrechung bzw. Beendigung der Aufgabe vor der

manuellen Kontrollübernahme motivieren, so dass die Ergebnisse möglicherweise auf vergleichbare Bedingungen beschränkt sind.

Auch die Auswahl der Probanden bringt Limitationen in der Generalisierbarkeit der Ergebnisse mit sich. In allen Studien beinhaltete das Probandenkollektiv keine Fahrer mit visuell-motorischen Einschränkungen (bspw. durch Krankheit oder Alter, siehe Kray & Lindenberger, 2000; Li, Blythe, Guo, & Namdeo, 2019). Vor dem Hintergrund der relativ komplexen visuellen Anzeigen der Automation und der Notwendigkeit der Texteingabe über das digitale Tablet-Keyboard in Studie 2 und 3 ist eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse im Hinblick auf solche Probandengruppen nur eingeschränkt möglich. Dies muss vor dem Hintergrund erwähnt werden, dass gerade Nutzer, deren Fähigkeiten zur Fahrzeugführung eingeschränkt sind, zukünftig eine mögliche Hauptzielgruppe von Fahrzeugautomation darstellen könnten. Insofern sollten weiterführende Studien eine Erweiterung der Stichprobe bzw. eine gezielte Rekrutierung der angesprochenen Probanden vorsehen.

4.5 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Aus dieser Arbeit resultiert in mehreren Punkten weiterer Forschungsbedarf. Die Studien dieser Arbeit konzentrierten sich vor allem auf den Wechsel von der fahrfremden Tätigkeit zum manuellen Fahren. Ein Aspekt von Aufgabenunterbrechungen, der in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet wurde, vermutlich jedoch starke Auswirkungen darauf hat, ob fahrfremde Tätigkeiten beim automatisierten Fahren komfortabel und zufriedenstellend ausgeführt werden können, ist die Minimierung von Wiederaufnahmekosten unterbrochener Tätigkeiten (*resumption cost*; Monk, Boehm-Davis, & Traflet, 2004; Monk et al., 2008). Wenn die Unterbrechung durch das manuelle Fahren zu einer Verschlechterung der Bearbeitungsqualität von während der automatisierten Fahrt ausgeführten Tätigkeiten führt (siehe Grundgeiger et al., 2010; Latorrella, 1996; Willett et al., 2018 für Beispiele von Aufgabenunterbrechungen aus der Anwendungsforschung), können daraus negative Konsequenzen für die Akzeptanz des automatisierten Fahrens entstehen (König & Neumayr, 2017). Zukünftige Studien sollten deshalb Effekte auf die Qualität und Zufriedenstellung mit der Bearbeitung komplexer fahrfremder Tätigkeiten stärker als in dieser Arbeit in den Vordergrund rücken. Außerdem ist vorstellbar, dass andere Tätigkeiten, die zu einem stärkeren Maß das Erreichen von Teilzielen während einer automatisierten Fahrtepisode erfordern (z. B. wenn die Wiederaufnahme mit einer anspruchsvollen Neuorientierung in der Aufgabe verbunden ist), durch Unterbrechungen deutlich höhere Kosten bei der Bearbeitungsqualität und -schnelligkeit nach sich ziehen. Dies gilt ebenso für Tätigkeiten, die aufgrund einer schlechteren Unterbrechbarkeit höhere Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis stellen (z. B. wenn Inhalte während der Unterbrechung durch das automatisierte Fahren nicht

vergessen werden dürfen). Für ein vollständigeres Verständnis der Auswirkungen von Unterbrechungen von Tätigkeiten beim automatisierten Fahren sollte der Aspekt der Wiederaufnahmekosten in zukünftigen Arbeiten stärker beachtet werden.

Die Ergebnisse der Arbeit haben außerdem deutlich gemacht, dass der Planung fahrfremder Tätigkeiten während der Fahrt eine entscheidende Rolle sowohl für die Effizienz der manuellen Kontrollübernahme als auch für die Nutzung der Zeit im automatisierten Modus zukommt. Im Alltag ist jedoch davon auszugehen, dass die strategische Planung dazu, wie die Zeit im automatisierten Modus verwendet werden soll, schon beginnt, *bevor* die Nutzer automatisierter Fahrzeuge überhaupt ihre Fahrt antreten. Die unterschiedlich langen Tätigkeiten, die von den Probanden während der dritten Studie je nach der zur Verfügung stehenden Zeit im automatisierten Modus ausgewählt wurden, müssen unter praktischen Gesichtspunkten während der automatisierten Fahrt überhaupt vorhanden sein, um einen strategischen Umgang zu ermöglichen. Wenn keine passenden Angebote zur Beschäftigung mit unterschiedlich langen oder komplexen fahrfremden Tätigkeiten verfügbar sind, kann das Unterstützungskonzept auch nicht greifen. Dies bedeutet, dass eine strategische Planung der Verwendung der Zeit im automatisierten Modus schon vor dem Fahrtbeginn ansetzen muss, damit beispielsweise die Mitnahme entsprechender elektronischer Geräte oder einer Zeitschrift ins Fahrzeug nicht vergessen wird. Dies ist auch unter dem Aspekt zu sehen, dass von einer fehlenden Beschäftigungsmöglichkeit ebenfalls ein Risiko ausgehen kann. Wenn dem Nutzer keine Möglichkeiten zur Beschäftigung zur Verfügung stehen, droht die Abnahme der Reaktionsbereitschaft durch das Einsetzen von Monotonie und Müdigkeit (Jarosch et al., 2019; Radlmayr et al., 2019). Da die Technologie und deren Funktionsweise zukünftigen Nutzern automatisierter Fahrzeuge aber gerade in deren Einführungsphase noch nicht vertraut sein wird, stellt die Unterstützung bei der Planung der sinnvollen Verwendung der Zeit im automatisierten Modus eine Herausforderung für künftige Forschung dar. Es ist zu erwarten, dass zukünftige Nutzer erst mit der Zeit lernen werden, die Notwendigkeit der Planung der Verwendung ihrer Zeit im automatisierten Modus zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist deshalb auch die Untersuchung von Langzeiteffekten auf die strategische Planung von Aufgaben während der Fahrt in zukünftigen Studien sinnvoll (siehe bspw. Large et al., 2017).

4.6 Praktische Implikationen und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit können von Fahrzeugherstellern für die Gestaltung von Anzeige Konzepten automatisierter Fahrzeuge genutzt werden. Bei Verwendung von diskreten, event-basierten Ankündigungen sollte das erforderliche Fahrmanöver und die Entfernung zur Systemgrenze mindestens einen Kilometer (entspricht 30 Sekunden bei 120 km/h) vor Erreichen

der Systemgrenze angezeigt werden. Spezifische Ankündigungen, die Informationen zu erforderlichen Fahrmanövern nach der Übernahme enthalten, wurden subjektiv bevorzugt und führten in komplexen Situationen, bei denen ein Ausweichmanöver notwendig ist, zu frühzeitigeren Fahrstreifenwechseln. Die Verhaltenswirksamkeit spezifischer Ankündigung kann durch eine frühzeitige Präsentation noch gesteigert werden (bei 1000 m im Vergleich zu 500 m), durch eine zu frühe Präsentation kann dieser Vorteil jedoch wieder verloren gehen. Nichtsdestotrotz muss betont werden, dass auch auf spätere (d. h. 500 m vor Systemgrenze) unspezifische Situationsankündigungen (wenn beispielsweise keine hinreichenden Informationen über die bevorstehende Systemgrenze vorliegen) rechtzeitig reagiert wurde und keine sicherheitskritischen Ereignisse beobachtet wurden.

Wenn die entsprechende Technologie zur zuverlässigen frühzeitigen Prädiktion von Systemgrenzen zur Verfügung steht, ist in zukünftigen Anzeige Konzepten für hochautomatisiertes Fahren die Verwendung einer kontinuierlichen Distanzanzeige im automatisierten Modus zusätzlich zu einer diskreten Ankündigung zu empfehlen. Dadurch erhält der Fahrer die Möglichkeit, die verbleibende Zeit im automatisierten Modus abzuschätzen und strategische Entscheidungen bezüglich der Aufgabenbearbeitung zu treffen. Außerdem schätzten die Probanden diejenigen Anzeige Konzepte, die ihnen die Möglichkeit zu strategischen Entscheidungen boten, als nützlicher ein. Da die subjektive Nützlichkeit neben der Einfachheit der Benutzung eine Hauptdeterminante von Akzeptanz im *Technology Acceptance Model* darstellt (Davis, 1989; Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1989), ist mit einer Steigerung der Akzeptanz derartiger Systeme zu rechnen, die strategische Entscheidungsprozesse der Aufgabenauswahl während der automatisierten Fahrt ermöglichen.

Abschließend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass vor einer Anwendung der in den Studien gewonnenen Erkenntnisse die in den jeweiligen Studienteilen sowie generell diskutierten offenen Fragen und Limitationen adressiert werden müssen. Auch die Betrachtung von Fehlerfällen, die erste Hinweise zu deren Auswirkungen auf das Übernahmeverhalten liefert, sollte Gegenstand weiterer Studien sein, damit eine umfassende Beurteilung potentieller negativer Konsequenzen des erweiterten Anzeige Konzepts möglich ist.

5 Literaturverzeichnis

- Adamczyk, P. D., & Bailey, B. P. (2004). If not now, when? The effects of interruption at different moments within task execution. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 271–278). ACM.
- Adler, R. F., & Benbunan-Fich, R. (2013). Self-interruptions in discretionary multitasking. *Computers in Human Behavior*, 29(4), 1441–1449.
- Alliance of Automobile Manufacturers. (2006). *Statement of principles, criteria and verification procedures on driver interactions with advanced in-vehicle information and communication systems*.
- Allport, A., & Wylie, G. (1999). Task-switching: Positive and negative priming of task-set. In G. W. Humphreys, J. Duncan, & A. M. Treisman (Eds.), *Attention, space and action: Studies in cognitive neuroscience* (pp. 273–296). Oxford, England: Oxford University Press.
- Altmann, E. M. (2002). Functional decay of memory for tasks. *Psychological research*, 66, 287–297.
- Altmann, E. M. (2004). The preparation effect in task switching: Carryover of SOA. *Memory & Cognition*, 32(1), 153–163.
- Altmann, E. M., & Gray, W. D. (2008). An integrated model of cognitive control in task switching. *Psychological review*, 115(3), 602–639.
- Altmann, E. M., & Trafton, J. G. (2002a). Memory for goals: An activation-based model. *Cognitive science*, 26(1), 39–83.
- Altmann, E. M., & Trafton, J. G. (2004b). Task interruption: Resumption lag and the role of cues. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science* (Vol. 26, No. 26, pp. 43–48).
- Altmann, E. M., & Trafton, J. G. (2015). Brief Lags in Interrupted Sequential Performance: Evaluating a Model and Model Evaluation Method. *International Journal of Human-Computer Studies*, 79, 51–65. doi:10.1016/j.ijhcs.2014.12.007
- Arbuthnott, K. D., & Woodward, T. S. (2002). The influence of cue-task association and location on switch cost and alternating-switch cost. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 56(1), 18–29.

- Arrington, C. M., & Logan, G. D. (2005). Voluntary task switching: chasing the elusive homunculus. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*(4), 683–702.
- Atchley, P., & Chan, M. (2011). Potential benefits and costs of concurrent task engagement to maintain vigilance: A driving simulator investigation. *Human factors*, *53*(1), 3–12.
- Bahner, J. E., Elefand, M. F., & Manzey, D. (2008). Misuse of diagnostic aids in process control: The effects of automation misses on complacency and automation bias. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, No. 19, pp. 1330–1334). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Bailey, B. P., & Iqbal, S. T. (2008). Understanding changes in mental workload during execution of goal-directed tasks and its application for interruption management. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, *14*(4), Article 21, 28 pages.
- Bailey, B. P., & Konstan, J. A. (2006). On the need for attention-aware systems: Measuring effects of interruption on task performance, error rate, and affective state. *Computers in Human Behavior*, *22*(4), 685–708. doi:10.1016/j.chb.2005.12.009
- Bailey, B. P., Konstan, J. A., & Carlis, J. V. (2001). The Effects of Interruptions on Task Performance, Annoyance, and Anxiety in the User Interface. *Interact*, (1), 598–601.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. In *Analysis, design and evaluation of man-machine systems* (pp. 129–135). Elsevier.
- Blanco, M., Biever, W. J., Gallagher, J. P., & Dingus, T. A. (2006). The impact of secondary task cognitive processing demand on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, *38*(5), 895–906.
- Borojeni, S. S., Chuang, L., Heuten, W., & Boll, S. (2016). Assisting Drivers with Ambient Take-Over Requests in Highly Automated Driving. In *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 237–244).
- Borojeni, S. S., Weber, L., Heuten, W., & Boll, S. (2018). From reading to driving: priming mobile users for take-over situations in highly automated driving. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 1–12). ACM.
- Borst, J. P., Taatgen, N. A., & van Rijn, H. (2015). What makes interruptions disruptive?: A process-model account of the effects of the problem state bottleneck on task interruption and resumption. In *Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems* (pp. 2971–2980). ACM.

- Broadbent, D. E., & Broadbent, M. H. P. (1987). From detection to identification: Response to multiple targets in rapid serial visual presentation. *Perception & Psychophysics*, *42*(2), 105–113.
- Bromiley, P., & Curley, S. P. Individual differences in risk taking. In J. F. Yates (Ed.), *Wiley series in human performance and cognition. Risk-taking behavior* (pp. 87–132). John Wiley & Sons.
- Brookhuis, K. A., & de Waard, D. (2010). Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures. *Accident Analysis & Prevention*, *42*(3), 898–903.
- Brown, C. M., & Noy, Y. I. (2004). Behavioural adaptation to in-vehicle safety measures: Past ideas and future directions. In *Traffic and Transport Psychology: Proceedings of the ICTTP 2000* (pp. 25–46). Elsevier.
- Brumby, D. P., Salvucci, D. D., & Howes, A. (2009). Focus on driving: How cognitive constraints shape the adaptation of strategy when dialing while driving. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1629–1638). ACM.
- Carsten, O., Lai, F. C. H., Barnard, Y., Jamson, A. H., & Merat, N. (2012). Control task substitution in semiautomated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human factors*, *54*(5), 747–761.
- Carvalho, A., Lefèvre, S., Schildbach, G., Kong, J., & Borrelli, F. (2015). Automated driving: The role of forecasts and uncertainty - A control perspective. *European Journal of Control*, *24*, 14–32.
- Cazzulino, F., Burke, R. V., Muller, V., Arbogast, H., & Upperman, J. S. (2014). Cell phones and young drivers: a systematic review regarding the association between psychological factors and prevention. *Traffic injury prevention*, *15*(3), 234–242.
- Cohen-Lazry, G., Katzman, N., Borowsky, A., & Oron-Gilad, T. (2018). Ipsilateral versus contralateral tactile alerts for take-over requests in highly-automated driving. In *Proceedings of the 6th Humanist Conference. The Hague, Netherlands* (pp. 1–6).
- Coppola, C., & Frank, B. J. (2018, June 22). Report: Uber driver was watching 'The Voice' moments before fatal Tempe crash. *azcentral.com*. Retrieved from <https://eu.azcentral.com/story/news/local/tempe-breaking/2018/06/21/uber-self-driving-car-crash-tempe-police-elaine-herzberg/724344002/>
- Cummings, M. L., Kilgore, R. M., Wang, E., Tijerina, L., & Kochhar, D. S. (2007). Effects of single versus multiple warnings on driver performance. *Human factors*, *49*(6), 1097–1106.

- Czerwinski, M., Cutrell, E., & Horvitz, E. (2000). Instant messaging: Effects of relevance and timing. In *People and computers XIV: Proceedings of HCI* (pp. 71–76).
- Czerwinski, M., Horvitz, E., & Wilhite, S. (2004). A diary study of task switching and interruptions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 175–182). ACM.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. In *5. Tagung Fahrerassistenz*, München.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319–340.
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1989). User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models. *Management science*, 35(8), 982–1003.
- De Visser, Ewart J, Pak, R., & Shaw, T. H. (2018). From ‘automation’ to ‘autonomy’: the importance of trust repair in human–machine interaction. *Ergonomics*, 61(10), 1409–1427.
- 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., 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.
- Deniaud, C., Honnet, V., Jeanne, B., & Mestre, D. (2015). The concept of “presence” as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of Interaction Science*, 3(1), 1–13.
- Deutscher Bundestag (2017, March 29). *Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur (15. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksachen 18/11300, 18/11534, 18/11683 Nr. 10 – Entwurf eines ... Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes*. Retrieved from <https://www.cr-online.de/1811776.pdf>
- Deutscher Bundestag (2017, March 30). *Straßenverkehrsgesetz für automatisiertes Fahren geändert*. Retrieved from <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2017/kw13-de-automatisiertes-fahren-499928>
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., . . . Gupta, S. (2006). *The 100-car naturalistic driving study. Phase 2: results of the 100-car field*

- experiment*: United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration.
- Dixit, V. V., Chand, S., & Nair, D. J. (2016). Autonomous vehicles: disengagements, accidents and reaction times. *PloS one*, *11*(12), 1–14, e0168054.
- Dogan, E., Rahal, M.-C., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A., & Perrin, J. (2017). Transition of control in a partially automated vehicle: Effects of anticipation and non-driving-related task involvement. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *46*, 205–215. doi:10.1016/j.trf.2017.01.012
- Eilers, K., Nachreiner, F., & Hänecke, K. (1986). Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, (4), 214–224.
- Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference* (pp. 789–795). IEEE.
- Endsley, M. R. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, *42*(3), 462–492.
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human factors*, *37*(2), 381–394.
- Engström, J., Markkula, G., Victor, T., & Merat, N. (2017). Effects of cognitive load on driving performance: The cognitive control hypothesis. *Human factors*, *59*(5), 734–764.
- Eriksson, A., Petermeijer, B. M., Zimmermann, M., de Winter, J., Bengler, K. J., & Stanton, N. A. (2018). Rolling out the red (and green) carpet: supporting driver decision making in automation-to-manual transitions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *49*(1), 20–31.
- Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017a). Driving Performance After Self-Regulated Control Transitions in Highly Automated Vehicles. *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *59*(8), 1233–1248.
- Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017b). Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control. *Human factors*, *59*(4), 689–705.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *77*, 167–181.
- Favarò, F., Eurich, S., & Nader, N. (2018). Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis & Prevention*, *110*, 136–148.

- Feldhütter, A., Härtwig, N., Kurpiers, C., Mejia Hernandez, J., & Bengler, K. (2018). Effect on Mode Awareness When Changing from Conditionally to Partially Automated Driving. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 314–324). Springer.
- Feldhütter, A., Gold, C., Schneider, S., & Bengler, K. (2017). How the duration of automated driving influences take-over performance and gaze behavior. In *Advances in ergonomic design of systems, products and processes* (pp. 309–318). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (Third edition): Sage.
- Fitts, P. M., Viteles, M. S., Barr, N. L., Brimhall, Finch, G., Gardner, E., . . . Stevens, S. S. (1951). *Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system, and appendixes 1 thru 3*. Columbus: Ohio State University Research Foundation.
- Forster, Y., Hergeth, S., Naujoks, F., Beggiato, M., Krems, J. F., & Keinath, A. (2019). Learning to use automation: Behavioral changes in interaction with automated driving systems. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 599–614.
- Forster, Y., Hergeth, S., Naujoks, F., Krems, J., & Keinath, A. (2019). User Education in Automated Driving: Owner's Manual and Interactive Tutorial Support Mental Model Formation and Human-Automation Interaction. *Information*, 10(4), 143.
- Forster, Y., Naujoks, F., & Neukum, A. (2016). Your turn or my turn?: Design of a human-machine interface for conditional automation. In *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 253–260). ACM.
- Forster, Y., Naujoks, F., Neukum, A., & Huestegge, L. (2017). Driver compliance to take-over requests with different auditory outputs in conditional automation. *Accident Analysis & Prevention*, 109, 18–28.
- Fox, S., & Hoffman, M. (2002). Escalation behavior as a specific case of goal-directed activity: A persistence paradigm. *Basic and Applied Social Psychology*, 24(4), 273–285.
- Gartenberg, D., Breslow, L., McCurry, J. M., & Trafton, J. G. (2014). Situation awareness recovery. *Human factors*, 56(4), 710–727.
- Gold, C. (2016). *Modeling of take-over performance in highly automated vehicle guidance* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Gold, C., Damböck, D., & Bengler, K. (2013). Partially automated driving as a fallback level of high automation. In *6. Tagung Fahrerassistenz*, München.
- 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). Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Gold, C., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bellem, H., & Jarosch, O. (2017). Testing scenarios for human factors research in level 3 automated vehicles. In *International conference on applied human factors and ergonomics* (pp. 551–559). Springer, Cham.
- Goschke, T. (2000). Intentional reconfiguration and J-TI Involuntary Persistence In Task Set Switching. *Control of cognitive processes: Attention and performance XVIII*, 18, 331–355.
- Green, M. (2000). "How long does it take to stop?" Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transportation human factors*, 2(3), 195-216.
- Greis, F. (2019, December 2). Der Zulassungstau löst sich langsam auf. *Golem.de*. Retrieved from <https://www.golem.de/news/staupilot-regierung-rechnet-fuer-mitte-2020-mit-automatisierten-autos-1912-145264.html>
- Grundgeiger, T., Sanderson, P., MacDougall, H. G., & Venkatesh, B. (2010). Interruption management in the intensive care unit: Predicting resumption times and assessing distributed support. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 16(4), 317.
- Guanetti, J., Kim, Y., & Borrelli, F. (2018). Control of connected and automated vehicles: State of the art and future challenges. *Annual reviews in control*, 45, 18–40.
- Hancock, P. A. (2017). On the nature of vigilance. *Human factors*, 59(1), 35–43.
- Heller, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). *Psychologische Beiträge*, 27(4), 478–493.
- Hergeth, S., Lorenz, L., Vilimek, R., & Krems, J. F. (2016). Keep your scanners peeled: Gaze behavior as a measure of automation trust during highly automated driving. *Human factors*, 58(3), 509–519.
- Hoffmann, S., & Buld, S. (2006). Driving in a simulator. Design and evaluation of a training programme. *VDI Berichte*, 2006(1960), 113–132.
- Holländer, K., & Pfleging, B. (2018). Preparing drivers for planned control transitions in automated cars. In *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (pp. 83–92). ACM.
- Howell, D. C. (2007). *Statistical methods for psychology*. International student edition (6th ed.): Cengage Learning.
- Iqbal, S. T., & Bailey, B. P. (2005). Investigating the effectiveness of mental workload as a predictor of opportune moments for interruption. In *CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 1489–1492).

-
- ISO/TR 21959-1:2018. *Road vehicles — Human performance and state in the context of automated driving — Part 1: Common underlying concepts.*
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M. J., & Lai, F. C. H. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation research part C: emerging technologies*, *30*, 116–125.
- Janssen, C. P., & Brumby, D. P. (2015). Strategic adaptation to task characteristics, incentives, and individual differences in dual-tasking. *PloS one*, *10*(7), e0130009.
- Janssen, C. P., Brumby, D. P., & Garnett, R. (2012). Natural break points: The influence of priorities and cognitive and motor cues on dual-task interleaving. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *6*(1), 5–29.
- Janssen, C. P., Iqbal, S. T., Kun, A. L., & Donker, S. F. (2019). Interrupted by my car? Implications of interruption and interleaving research for automated vehicles. *International Journal of Human-Computer Studies*, *130*, 221–233.
- Jarosch, O., Bellem, H., & Bengler, K. (2019). Effects of Task-Induced Fatigue in Prolonged Conditional Automated Driving. *Human factors*, 0018720818816226.
- Jarosch, O., Kuhnt, M., Paradies, S., & Bengler, K. (2017). It's out of our hands now! Effects of non-driving related tasks during highly automated driving on drivers' fatigue. In *Proceedings of the 9th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 319-325). University of Iowa: Public Policy Center.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, *16*(3), 126–131.
- Kelly, D., & Efthymiou, M. (2019). An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. *Journal of safety research*, *69*, 155–165.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological bulletin*, *136*(5), 849.
- Kircher, K., Larsson, A., & Hultgren, J. A. (2013). Tactical driving behavior with different levels of automation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *15*(1), 158–167.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data.

- Koch, I. (2005). Sequential task predictability in task switching. *Psychonomic bulletin & review*, *12*(1), 107–112.
- König, M., & Neumayr, L. (2017). Users' resistance towards radical innovations: The case of the self-driving car. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *44*, 42–52.
- Koo, J., Kwac, J., Ju, W., Steinert, M., Leifer, L., & Nass, C. (2015). Why did my car just do that? Explaining semi-autonomous driving actions to improve driver understanding, trust, and performance. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *9*(4), 269–275.
- Körber, M., Baseler, E., & Bengler, K. (2018). Introduction matters: Manipulating trust in automation and reliance in automated driving. *Applied ergonomics*, *66*, 18–31.
- Körber, M., Gold, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *39*, 19–32.
- Körber, M., Prasch, L., & Bengler, K. (2018). Why Do I Have to Drive Now? Post Hoc Explanations of Takeover Requests. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *60*(3), 305–323.
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and aging*, *15*(1), 126.
- Kreifeldt, J. G., & McCarthy, M. E. Interruption as a test of the user-computer interface. In *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference on Manual Control* (pp. 655–667). JPL Publication.
- Kühn, M., Vogelpohl, T., & Vollrath, M. (2017). Takeover times in highly automated driving (level 3). In *25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration* (pp. 1–11).
- Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *32*, 127–140.
- Langlois, S., & Soualmi, B. (2016). Augmented reality versus classical HUD to take over from automated driving: An aid to smooth reactions and to anticipate maneuvers. In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1571–1578). IEEE.

- Lapoehn, S., Dziennus, M., Utesch, F., Kelsch, J., Schieben, A., Dotzauer, M., . . . Köster, F. (2016). Interaction design for nomadic devices in highly automated vehicles. In: B. Weyers. & A. Dittmar (Eds), *Mensch und Computer 2016 – Workshopband*. Aachen: Gesellschaft für Informatik e.V..
- Large, D. R., Banks, V. A., Burnett, G., Baverstock, S., & Skrypchuk, L. (2017). Exploring the Behaviour of Distracted Drivers during Different Levels of Automation in Driving. In *Proceedings of the 5th International Conference on Driver Distraction and Inattention (DDI2017)*.
- Large, D. R., Burnett, G., Morris, A., Muthumani, A., & Matthias, R. (2017). A longitudinal simulator study to explore drivers' behaviour during highly-automated driving. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 583–594). Springer.
- Larsson, A. (2017). A Countdown to Manual Driving: How Do Drivers Get “Back-in-the-Loop”? In *Advances in Human Aspects of Transportation* (pp. 463–471). Springer.
- Larsson, A. F., Kircher, K., & Andersson Hultgren, J. (2014). Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 229–237. doi:10.1016/j.trf.2014.05.008
- Latorella, K. A. (1996). Investigating interruptions: An example from the flightdeck. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 40, No. 4, pp. 249–253). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Latorella, K. A. (1998). Effects of modality on interrupted flight deck performance: Implications for data link. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 42, No. 1, pp. 87–91). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Lauriola, M., Panno, A., Levin, I. P., & Lejuez, C. W. (2014). Individual differences in risky decision making: A meta-analysis of sensation seeking and impulsivity with the balloon analogue risk task. *Journal of Behavioral Decision Making*, 27(1), 20–36.
- Lee, H. C. (2003). The validity of driving simulator to measure on-road driving performance of older drivers. *Transport engineering in Australia*, 8(2), 89.
- Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35(10), 1243–1270.
- Lee, J. D., Gore, B. F., & Campbell, J. L. (1999). Display alternatives for in-vehicle warning and sign information: Message style, location, and modality. *Transportation Human Factors*, 1(4), 347–375.

- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human factors*, 46(1), 50–80.
- Li, S., Blythe, P., Guo, W., & Namdeo, A. (2019). Investigation of older drivers' requirements of the human-machine interaction in highly automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 546–563.
- Li, S. Y. W., Blandford, A., Cairns, P., & Young, R. M. (2008). The effect of interruptions on postcompletion and other procedural errors: an account based on the activation-based goal memory model. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(4), 314.
- Liu, S., Wadeson, A., Kim, N. Y., & Nam, C. S. (2016). Effects of working memory capacity, task switching, and task difficulty on multitasking performance. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society annual meeting* (Vol. 1, pp. 502–506). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Llaneras, R. E., Salinger, J., & Green, C. A. Human factors issues associated with limited ability autonomous driving systems: Drivers' allocation of visual attention to the forward roadway. In *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 92–98). University of Iowa: Public Policy Center.
- Logan, G. D., & Schneider, D. W. (2006). Priming or executive control? Associative priming of cue encoding increases “switch costs” in the explicit task-cuing procedure. *Memory & Cognition*, 34(6), 1250–1259.
- Lorenz, L., Kerschbaum, P., Hergeth, S., Gold, C., & Radlmayr, J. (2015). Vom Dual-Task zum Sequential-Task Paradigma: Ein Rückblick über Fahrstudien. In *7. Tagung Fahrerassistenz*, München.
- 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). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Louw, T., Kuo, J., Romano, R., Radhakrishnan, V., Lenné, M. G., & Merat, N. (2019). Engaging in NDRTs affects drivers' responses and glance patterns after silent automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 870–882.
- Lu, Z., Zhang, B., Feldhütter, A., Happee, R., Martens, M., & de Winter, J. (2019). Beyond mere take-over requests: The effects of monitoring requests on driver attention, take-over performance, and acceptance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 63, 22–37.

- Lu, Z., Coster, X., & de Winter, J. (2017). How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving. *Applied ergonomics*, *60*, 293–304.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly journal of experimental psychology*, *1*(1), 6–21.
- Mai, C. (2015). *Vertrauen in Automation im Fahrzeug – Einflussfaktoren und Verhaltensindikatoren* (Masterarbeit). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Marberger, C., Mielenz, H., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bengler, K., & Wandtner, B. (2017). Understanding and applying the concept of “driver availability” in automated driving. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 595–605). Cham: Springer.
- Mark, G., Gudith, D., & Klocke, U. (2008). The cost of interrupted work: more speed and stress. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 107–110). ACM.
- May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *12*(3), 218–224.
- Mayr, U., & Kliegl, R. (2000). Task-set switching and long-term memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(3), 1124–1140.
- Mayr, U., & Kliegl, R. (2003). Differential effects of cue changes and task changes on task-set selection costs. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(3), 362.
- McFarlane, D. (1999). Coordinating the interruption of people in human-computer interaction. In A. Sasse & C. Johnson (Eds.), *Human-Computer Interaction — INTERACT* (99th ed., pp. 295–303). IOS Press.
- McFarlane, D. C., & Latorella, K. A. (2002). The scope and importance of human interruption in human-computer interaction design. *Human-Computer Interaction*, *17*(1), 1–61.
- Mehler, B., & Reimer, B. (2019). How demanding is "just driving?" A cognitive workload-physiological reference evaluation. In *Proceedings of the 10th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design* (pp. 363–369). University of Iowa: Public Policy Center.
- Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*(6), 1423.

- Meiran, N. (2000). Modeling cognitive control in task-switching. *Psychological research*, 63(3-4), 234–249.
- Meiran, N., Chorev, Z., & Sapir, A. (2000). Component processes in task switching. *Cognitive psychology*, 41(3), 211–253.
- Melcher, V., Rauh, S., Diederichs, F., Widloither, H., & Bauer, W. (2015). Take-over requests for automated driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2867–2873.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Daly, M., & Carsten, O. M. J. (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.
- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J. D., Johansson, E., . . . Itoh, M. (2019). The “out-of-the-loop” concept in automated driving: Proposed definition, measures and implications. *Cognition, Technology & Work*, 21(1), 87–98.
- Metz, B., Schömig, N., & Krüger, H.-P. (2011). Attention during visual secondary tasks in driving: Adaptation to the demands of the driving task. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(5), 369–380.
- Meyer, J. (2004). Conceptual issues in the study of dynamic hazard warnings. *Human factors*, 46(2), 196–204.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In *Human behavior and traffic safety* (pp. 485–524). Boston, MA: Springer.
- Miller, D., Sun, A., Johns, M., Ive, H., Sirkin, D., Aich, S., & Ju, W. (2016). Distraction Becomes Engagement in Automated Driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), 1676–1680. doi:10.1177/1541931215591362
- Miyake, A., Emerson, M. J., Padilla, F., & Ahn, J.-c. (2004). Inner speech as a retrieval aid for task goals: The effects of cue type and articulatory suppression in the random task cuing paradigm. *Acta psychologica*, 115(2-3), 123–142.
- Mok, B., Johns, M., Miller, D., & Ju, W. (2017). Tunneled in: Drivers with active secondary tasks need more time to transition from automation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2840–2844).
- Monk, C. A., Boehm-Davis, D. A., Mason, G., & Trafton, J. G. (2004). Recovering from interruptions: Implications for driver distraction research. *Human factors*, 46(4), 650–663.
- Monk, C. A., Boehm-Davis, D. A., & Trafton, J. G. (2002). The attentional costs of interrupting task performance at various stages. In *Proceedings of the human factors and ergonomics*

-
- society annual meeting* (Vol. 46, No. 22, pp. 1824–1828). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Monk, C. A., Boehm-Davis, D. A., & Trafton, J. G. (2004). Very brief interruptions result in resumption cost. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science* (Vol. 26, No. 26).
- Monk, C. A., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2008). The effect of interruption duration and demand on resuming suspended goals. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *14*(4), 299.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(3), 134–140. doi:10.1016/S1364-6613(03)00028-7
- Monsell, S., Sumner, P., & Waters, H. (2003). Task-set reconfiguration with predictable and unpredictable task switches. *Memory and Cognition*, *31*(3), 327–342.
- Morgenstern, T., Naujoks, F., Krems, J. F., & Keinath, A. (2018). Under which driving contexts do drivers decide to engage in mobile phone related tasks? An analysis of European naturalistic driving data. In T. Victor, Bruyas M. P., Regan M., Brusque C., Fort A., & Jallais C. (Eds.), *Proceedings of the 6th Driver Distraction and Inattention conference*.
- Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, *39*(3), 429–460.
- Müller, H., Kazakova, A., Pielot, M., Heuten, W., & Boll, S. (2013). Ambient timer–unobtrusively reminding users of upcoming tasks with ambient light. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. Springer.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2013). Visual-manual NHTSA driver distraction guidelines for in-vehicle electronic devices. *Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT)*,
- Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2018). A review of non-driving-related tasks used in studies on automated driving. In N. Stanton (Ed.), *Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 597, pp. 525–537). Springer, Cham.
- Naujoks, F., Forster, Y., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2017a). A human-machine interface for cooperative highly automated driving. In *Advances in Human Aspects of Transportation* (pp. 585–595). Springer.

- Naujoks, F., Forster, Y., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2017b). Improving usefulness of automated driving by lowering primary task interference through HMI design. *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- Naujoks, F., Grattenthaler, H., Neukum, A., Weidl, G., & Petrich, D. (2015). Effectiveness of advisory warnings based on cooperative perception. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(6), 606–617.
- Naujoks, F., Höfling, S., Purucker, C., & Zeeb, K. (2018). From partial and high automation to manual driving: Relationship between non-driving related tasks, drowsiness and take-over performance. *Accident Analysis & Prevention*, 121, 28–42.
- 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*, 7(Part I), 431.
- Naujoks, F., & Neukum, A. (2014). Specificity and timing of advisory warnings based on cooperative perception. In *Mensch & Computer Workshopband* (pp. 229–238).
- Naujoks, F., Purucker, C., & Neukum, A. (2016). Secondary task engagement and vehicle automation—Comparing the effects of different automation levels in an on-road experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 38, 67–82.
- Naujoks, F., Purucker, C., Wiedemann, K., & Marberger, C. (2019). Noncritical State Transitions During Conditionally Automated Driving on German Freeways: Effects of Non-Driving Related Tasks on Takeover Time and Takeover Quality. *Human factors*, 61(4), 596–613.
- Naujoks, F., Purucker, C., Wiedemann, K., Neukum, A., Wolter, S., & Steiger, R. (2017). Driving performance at lateral system limits during partially automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 147–162.
- Naujoks, F., & Totzke, I. (2014). Behavioral adaptation caused by predictive warning systems—The case of congestion tail warnings. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26, 49–61.
- Naujoks, F., Wiedemann, K., & Schömig, N. (2017). The Importance of Interruption Management for Usefulness and Acceptance of Automated Driving. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 254–263).
- Naujoks, F., Wiedemann, K., Schömig, N., Jarosch, O., & Gold, C. (2018). Expert-based controllability assessment of control transitions from automated to manual driving. *MethodsX*, 5, 579–592.

- Neubauer, C., Matthews, G., Langheim, L., & Saxby, D. (2012). Fatigue and voluntary utilization of automation in simulated driving. *Human factors*, 54(5), 734–746.
- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In 5. *Workshop Fahrerassistenzsysteme* (pp. 141–150). Karlsruhe: fmrt.
- Nicholson, R., Karayanidis, F., Davies, A., & Michie, P. T. (2006). Components of task-set reconfiguration: differential effects of 'switch-to' and 'switch-away' cues. *Brain research*, 1121(1), 160–176. doi:10.1016/j.brainres.2006.08.101
- O'Brien, R. G., & Kaiser, M. K. (1985). MANOVA method for analyzing repeated measures designs: an extensive primer. *Psychological bulletin*, 97(2), 316.
- 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), 476–488.
- Ostendorp, M.-C., Harre, A., Jacob, S., Müller, H., Heuten, W., & Boll, S. (2013). Ambient Progress Bar-relaxed and efficient work in waiting periods. In *Mensch & Computer* (pp. 221–229).
- Pampel, S. M., Large, D. R., Burnett, G., Matthias, R., Thompson, S., & Skrypchuk, L. (2019). Getting the driver back into the loop: the quality of manual vehicle control following long and short non-critical transfer-of-control requests: TI: NS. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 265–283.
- Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human factors*, 52(3), 381–410.
- Parasuraman, R., Mouloua, M., Molloy, R., & Hilburn, B. (1996). Monitoring of automated systems. *Automation and human performance: Theory and applications*, 91–115.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2), 230–253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297.
- 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. In 6. *Tagung Fahrerassistenz*, München.

-
- Petermeijer, B., Doubek, F., & de Winter, J. (2017). Driver response times to auditory, visual, and tactile take-over requests: A simulator study with 101 participants. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 1505–1510).
- Petermeijer, B. M., Cieler, S., & de Winter, J. (2017). Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat. *Accident Analysis & Prevention*, *99*, 218–227.
- Pfleging, B., Rang, M., & Broy, N. (2016). Investigating user needs for non-driving-related activities during automated driving. In *Proceedings of the 15th international conference on mobile and ubiquitous multimedia* (pp. 91–99). NY, USA: ACM.
- Politis, I., Brewster, S., & Pollick, F. (2017). Using multimodal displays to signify critical handovers of control to distracted autonomous car drivers. *International Journal of Mobile Human Computer Interaction (IJMHCI)*, *9*(3), 1–16.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of experimental psychology: General*, *109*(2), 160.
- Purucker, C., Rürger, F., Schneider, N., Neukum, A., & Färber, B. (2014). Comparing the perception of critical longitudinal distances between dynamic driving simulation, test track and Vehicle in the Loop. In *Advances in human aspects of transportation. Proceedings of the 5th AHFE. Karkow, Polen* (Vol. 19, pp. 421–430).
- Purucker, C., Schneider, N., Rürger, F., & Frey, A. (2018). Validity of Research Environments—Comparing Criticality Perceptions Across Research Environments. In *UR:BAN Human Factors 2018* (pp. 423–446).
- Radlmayr, J., Feldhütter, A., Frey, A., Jarosch, O., Marberger, C., Naujoks, F., . . . Bengler, K. (2019). Drowsiness and fatigue in conditionally automated driving—Towards an integrative framework. In de Waard, D., K. Brookhuis, D. Coelho, S. Fairclough, D. Manzey, Naumann, A., Onnasch, L., . . . R. Wiczorek (Eds.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2018 Annual Conference*.
- 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). Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA.
- Rasmussen, J. (1980). Some trends in man-machine interface design for industrial process plants. *Risø-M*; No. 2228).

- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext* (Dissertation). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Rauffet, P., Botzer, A., Chauvin, C., Saïd, F., & Tordet, C. (2019). The relationship between level of engagement in a non-driving task and driver response time when taking control of an automated vehicle. *Cognition, Technology & Work*, 1–11.
- Reichling, J. (2015). *Entwicklung und Evaluation einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zum automatisierten Fahren* (Bachelorarbeit). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Reinmueller, K., Koehler, L., & Steinhauser, M. (2018). Adaptive warning signals adjusted to driver passenger conversation: Impact of system awareness on behavioral adaptations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 242–252.
- RESPONSE Consortium. (2006). *Code of practice for the design and evaluation of ADAS*.
- Richardson, N., Flohr, L., & Michel, B. (2018). Takeover Requests in Highly Automated Truck Driving: How Do the Amount and Type of Additional Information Influence the Driver–Automation Interaction? *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(4), 68.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of experimental psychology: General*, 124(2), 207.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 27(4), 763.
- SAE International. (2018). *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicle: J3016_201806*.
- Salvucci, D. D., & Bogunovich, P. (2010). Multitasking and monotasking: the effects of mental workload on deferred task interruptions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 85–88). ACM.
- Salvucci, D. D., Taatgen, N. A., & Borst, J. P. (2009). Toward a unified theory of the multitasking continuum: From concurrent performance to task switching, interruption, and resumption. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1819–1828). ACM.
- Samuel, S., Borowsky, A., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2016). Minimum time to situation awareness in scenarios involving transfer of control from an automated driving suite. *Transportation research record*, 2602(1), 115–120.

- Schartmüller, C., Riener, A., Wintersberger, P., & Frison, A.-K. (2018). Workaholic: on balancing typing-and handover-performance in automated driving. In *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 1–12). ACM.
- Schömig, N., & Metz, B. (2013). Three levels of situation awareness in driving with secondary tasks. *Safety Science*, *56*, 44–51.
- Schömig, N., Metz, B., & Krüger, H.-P. (2011). Anticipatory and control processes in the interaction with secondary tasks while driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *14*(6), 525–538.
- Schömig, N., Schoch, S., Neukum, A., Schumacher, M., & Wandtner, B. (2015). *Simulatorstudien zur Ablenkungswirkung fahrfremder Tätigkeiten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Carl Schünemann Verlag GmbH.
- Schwarz, F., & Fastenmeier, W. (2017). Augmented reality warnings in vehicles: Effects of modality and specificity on effectiveness. *Accident Analysis & Prevention*, *101*, 55–66.
- Seeliger, F., Weidl, G., Petrich, D., Naujoks, F., Breuel, G., Neukum, A., & Dietmayer, K. (2014). Advisory warnings based on cooperative perception. In *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings* (pp. 246–252). IEEE.
- Seppelt, B. D., Lees, M. N., & Lee, J. D. Driver distraction and reliance: Adaptive cruise control in the context of sensor reliability and algorithm limits. In *Proceedings of the 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design* (pp. 255–261). University of Iowa: Public Policy Center.
- Spiessl, W., & Hussmann, H. (2011). Assessing error recognition in automated driving. *IET Intelligent Transport Systems*, *5*(2), 103–111.
- Stanton, N. A., & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, *24*(1), 35–49.
- Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. M., & Nilsson, L. (2014). Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *27*, 218–228.
- Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: Dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological science*, *12*(6), 462–466.
- Strayer, D. L., Watson, J. M., & Drews, F. A. (2011). Cognitive distraction while multitasking in the automobile. In *Psychology of learning and motivation* (pp. 29–58). Elsevier.

- Thackray, R. I. (1981). The stress of boredom and monotony: A consideration of the evidence. *Psychosomatic medicine*, 43(2), 165–176.
- Thattham Research (2019). *Defining Safe Automated Driving - Insurer Requirements for Highway Automation*. Retrieved from <https://www.abi.org.uk/globalassets/files/publications/public/motor/2019/defining-safe-automation-technical-document-aug-2019.pdf>
- Thoma, S., Lindberg, T., & Klinker, G. (2009). Evaluation of a generic warning for multiple intersection assistance systems. *Human factors, security and safety*, 173–188.
- Totzke, I., Volk, M., Naujoks, F., & Krüger, H. P. (2013). Unzuverlässige Informationen über die Positionierung eines Stauendes: Wie wirken sich falsche Distanzangaben auf das Fahrerverhalten aus. *Intelligente Transport-und Verkehrssysteme und-dienste Niedersachsen eV (Ed.), AAET–Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 235–255.
- Trafton, J. G., Altmann, E. M., Brock, D. P., & Mintz, F. E. (2003). Preparing to resume an interrupted task: effects of prospective goal encoding and retrospective rehearsal. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(5), 583–603.
- Trafton, J. G., & Monk, C. A. (2007). Task Interruptions. *Review of Human Factors and Ergonomics*, 3(1), 111–126.
- Turner, L. D., Allen, S. M., & Whitaker, R. M. (2015). Interruptibility prediction for ubiquitous systems: conventions and new directions from a growing field. In *Proceedings of the 2015 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing* (pp. 801–812). ACM.
- Van den Beukel, A. P., van der Voort, M. C., & Eger, A. O. (2016). Supporting the changing driver's task: Exploration of interface designs for supervision and intervention in automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 43, 279–301.
- van der Heiden, R., Iqbal, S. T., & Janssen, C. P. (2017). Priming drivers before handover in semi-autonomous cars. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM.
- VanVoorhis, C. W., & Morgan, B. L. (2007). Understanding power and rules of thumb for determining sample sizes. *Tutorials in quantitative methods for psychology*, 3(2), 43–50.
- Victor, T. (2005). *U.S. Patent No. 6,974,414*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Victor, T. W., Tivesten, E., Gustavsson, P., Johansson, J., Sangberg, F., & Ljung Aust, M. (2018). Automation expectation mismatch: Incorrect prediction despite eyes on threat and hands on wheel. *Human factors*, 60(8), 1095–1116.
- Vlakveld, W., van Nes, N., de Bruin, J., Vissers, L., & van der Kroft, M. (2018). Situation awareness increases when drivers have more time to take over the wheel in a Level 3 automated car: A simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 917–929.
- Vogelpohl, T., Gehlmann, F., & Vollrath, M. (2019). Task Interruption and Control Recovery Strategies After Take-Over Requests Emphasize Need for Measures of Situation Awareness. *Human factors*, 0018720819866976.
- Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., & Vollrath, M. (2018). Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 55, 464–482.
- Walch, M., Lange, K., Baumann, M., & Weber, M. (2015). Autonomous driving: investigating the feasibility of car-driver handover assistance. In *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 11–18). ACM.
- Walker, F., Verwey, W. B., & Martens, M. (2018). Gaze behaviour as a measure of trust in automated vehicles. In *Proceedings of the the 6th Humanist Conference (June 2018)*.
- Wandtner, B. (2018). *Non-driving related tasks in highly automated driving-Effects of task characteristics and drivers' self-regulation on take-over performance* (Dissertation). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- Wandtner, B., Schömig, N., & Schmidt, G. (2018a). Effects of non-driving related task modalities on takeover performance in highly automated driving. *Human factors*, 60(6), 870–881.
- Wandtner, B., Schömig, N., & Schmidt, G. (2018b). Secondary task engagement and disengagement in the context of highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 253–263.
- Wang, Y., Mehler, B., Reimer, B., Lammers, V., D'Ambrosio, L. A., & Coughlin, J. F. (2010). The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing. *Ergonomics*, 53(3), 404–420.
- Weidl, G., Petrich, D., Kasper, D., Wedel, A., Breuel, G., & Singhal, V. (2013). Collision risk prediction and warning at road intersections using an object oriented Bayesian network. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 270–277). ACM.

- Wickens, C. D. (1995). Designing for situation awareness and trust in automation. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(23), 365–370.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159–177.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human factors*, 50(3), 449–455.
- Willett, M., Gillman, O., Shin, E., Sewart, E., Muller, D., Nauta, M., & Yoong, W. (2018). The impact of distractions and interruptions during Cesarean Sections: a prospective study in a London teaching hospital. *Archives of gynecology and obstetrics*, 298(2), 313–318.
- Wintersberger, P., Green, P., & Riener, A. (2017). Am I driving or are you or are we both? A taxonomy for handover and handback in automated driving. In *Proceedings of the Ninth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 333–339). University of Iowa: Public Policy Center.
- Wintersberger, P., Riener, A., Schartmüller, C., Frison, A.-K., & Weigl, K. (2018). Let Me Finish before I Take Over: Towards Attention Aware Device Integration in Highly Automated Vehicles. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 53–65). ACM.
- Wittmann, M., Kiss, M., Gugg, P., Steffen, A., Fink, M., Pöppel, E., & Kamiya, H. (2006). Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. *Applied ergonomics*, 37(2), 187–199.
- Yan, X., Abdel-Aty, M., Radwan, E., Wang, X., & Chilakapati, P. (2008). Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 274–288.
- Yeung, N., & Monsell, S. (2003). Switching between tasks of unequal familiarity: The role of stimulus-attribute and response-set selection. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 29(2), 455.
- Yoon, S. H., Kim, Y. W., & Ji, Y. G. (2019). The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 150–158.
- Zarife, R. (2015). *Integrative Warning Concept for Multiple Driver Assistance Systems* (Dissertation). Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg.
- 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.
- Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A., & Schrauf, M. (2017). Why is steering not the same as braking? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver

- interventions during conditionally automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 50, 65–79.
- Zhang, B., de Winter, J., Varotto, S., Happee, R., & Martens, M. (2019). Determinants of take-over time from automated driving: A meta-analysis of 129 studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 285–307.
- Zhang, B., Wilschut, E. S., Willemsen, D. M. C., & Martens, M. H. (2019). Transitions to manual control from highly automated driving in non-critical truck platooning scenarios. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 84–97.
- Zhang, Y., Wu, C., Qiao, C., & Hou, Y. (2019). The effects of warning characteristics on driver behavior in connected vehicles systems with missed warnings. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 138–145.
- Zhang, Y., Yan, X., & Yang, Z. (2015). Discrimination of effects between directional and nondirectional information of auditory warning on driving behavior. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015.

6 Anhang

Studie 2

Tabelle 96: Verteilung der fehlenden Werte für die Variable „Zeitpunkt des Pausierens der Aufgabe“.

Bedingung (Zeitpunkt, Spezifität, Spurwechsel)	Nicht pausiert	Datenaufzeich- nungsfehler	Vor Ankündigung pausiert
500, unspezifisch, Spurwechsel	1	1	-
500, spezifisch, Spurwechsel	1	-	-
500, spezifisch, kein Spurwechsel	-	2	-
1000, spezifisch, kein Spurwechsel	-	-	1
2000, unspezifisch, kein Spurwechsel	1	-	-
2000, spezifisch, Spurwechsel	-	1	-
Summe	3	4	1

Tabelle 97: Verteilung der fehlenden Werte der Variable „Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Aufgabe“.

Bedingung (Zeitpunkt, Spezifität, Spurwechsel)	Aufgabe zuvor abgebrochen	Datenaufzeich- nungsfehler	Zu lange gewartet, da mit Befragung gerechnet
500, unspezifisch, Spurwechsel	2	-	1
500, spezifisch, Spurwechsel	1	-	-
500, spezifisch, kein Spurwechsel	-	2	-
1000, unspezifisch, Spurwechsel	-	-	1
1000, unspezifisch, kein Spurwechsel	-	-	2
2000, unspezifisch, kein Spurwechsel	1	-	-
2000, spezifisch, Spurwechsel	1	-	-
Summe	5	2	4

Studie 3

Tabelle 98: Verteilung der Aufgabenabbrüche auf Zeitpunkts- und Anzeigebedingungen.

Anzeige- zeitpunkt	Abbruch	Ankündigung	Vorausschau	Kombination	Σ
Vor Aufgaben- auswahl	kein Abbruch	44	44	45	133
	Abbruchtaste	2	1	1	4
	nicht eingeloggt	1	2	1	4
	TOR	0	0	0	0
	Fehlend	1	1	1	3
	Gesamt	48	48	48	144
Nach Aufgaben- auswahl	kein Abbruch	21	41	46	108
	Abbruchtaste	26	0	0	26
	nicht eingeloggt	0	2	1	3
	TOR	0	1	0	1
	Fehlend	1	4	1	6
	Gesamt	48	48	48	144