

**Der Einfluss fahrfremder Tätigkeiten auf die  
Fahrerübernahme während des hochautomatisierten  
Fahrens**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Kathrin Zeeb  
aus Herrenberg

Sindelfingen, Dezember 2016

aus dem Institut für Experimentelle Psychologie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Gedruckt mit der Genehmigung der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. Axel Buchner

Korreferent: PD Dr. Michael Schrauf

Tag der mündlichen Prüfung: 03.02.2017

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Abstract .....	5
1 Einleitung .....	6
1.1 Psychologische Grundlagen des Autofahrens .....	7
1.1.1 Aufmerksamkeit und Wahrnehmung .....	8
1.1.2 Workload .....	9
1.1.3 Situationsbewusstsein .....	11
1.2 Fahrerablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten .....	12
1.2.1 Auswirkungen kognitiver und auditiver Ablenkung .....	13
1.2.2 Auswirkungen visueller Ablenkung .....	14
1.3 Automation im Fahrkontext .....	16
1.3.1 Automationsgrade von Fahrerassistenzsystemen .....	16
1.3.2 Auswirkungen von Automation auf den Fahrer .....	18
1.3.3 Fahrerübernahme während des hochautomatisierten Fahrens .....	20
1.4 Weiterer Forschungsbedarf .....	25
1.5 Ziele der vorliegenden Arbeit .....	27
2 Studien .....	29
2.1 Studie 1 .....	30
2.2 Studie 2 .....	32
2.3 Studie 3 .....	34
3 Allgemeine Diskussion .....	38
3.1 Ablauf der Fahrerübernahme .....	38
3.2 Erkennung von Fahrerablenkung während des automatisierten Fahrens .....	40
3.3 Einfluss fahrfremder Tätigkeiten auf die Fahrerübernahme .....	41
Literaturverzeichnis .....	45
Einzelarbeiten .....	55

## Zusammenfassung

Autonomes Fahren ist derzeit in aller Munde. Der nächste Schritt auf dem Weg dorthin sind hochautomatisierte Systeme, deren Einführung bis zum Jahr 2020 erwartet wird (Cacilo et al., 2015; Underwood, 2015). Diese Systeme übernehmen sowohl die Quer- als auch Längsführung des Fahrzeugs und ermöglichen dem Fahrer im Unterschied zu heutigen Assistenzsystemen, sich von der Fahraufgabe ab- und fahrfremden Tätigkeiten zuzuwenden. Falls nötig, muss der Fahrer allerdings weiterhin in der Lage sein, die Fahrzeugführung wieder adäquat zu übernehmen (Gasser et al., 2012). Dadurch wird der Prozess der Fahrerübernahme zu einem der zentralen sicherheitsrelevanten Aspekte hochautomatisierter Systeme. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung dieses Prozesses. Besonderer Fokus wird dabei auf die Frage gelegt, welchen Einfluss die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten auf die Fahrerübernahme ausübt. Befunde hierzu sind bislang nicht eindeutig: Während in einigen Studien eine beeinträchtigte Übernahmefähigkeit abgelenkter Fahrer gefunden wurde (z.B. Körber, Gold, Lechner & Bengler, 2016), berichten andere Autoren einen wachsamkeitssteigernden Effekt fahrfremder Tätigkeiten (z.B. Neubauer, Matthews & Saxby, 2012).

Drei Fahrsimulatorversuche wurden zur Untersuchung dieser Fragestellung durchgeführt. In Studie 1 wurden die während der Fahrerübernahme ablaufenden motorischen und kognitiven Prozesse identifiziert. Studie 2 diente dazu, den Einfluss verschiedener naturalistischer fahrfremder Tätigkeiten auf die in Studie 1 aufgestellten Prozesse der Fahrerübernahme zu untersuchen. Basierend auf einer dieser Tätigkeiten wurde in Studie 3 die Stärke visuell-kognitiver und manueller Beanspruchung systematisch variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass neben Charakteristika der fahrfremden Tätigkeit auch situative Faktoren den Einfluss von Ablenkung auf die Fahrerübernahme bestimmen. Manuelle Beanspruchung führte v.a. bei Lenk- im Vergleich zu Bremsengriffen zu deutlichen Beeinträchtigungen der Übernahmeleistung. Der Einfluss visuell-kognitiver Beanspruchung scheint vielschichtiger zu sein. Bei geringer situativer Komplexität reagierten abgelenkte Fahrer ähnlich schnell wie nicht abgelenkte Fahrer. Bei hohen Anforderungen der Fahraufgabe hingegen führte die zusätzliche Beanspruchung kognitiver Ressourcen zu Beeinträchtigungen der Übernahmeleistung.

Diese Befunde liefern Erkenntnisse, wie fahrfremde Tätigkeiten die Übernahmefähigkeit der Fahrer beeinflussen und helfen, weiteren Forschungsbedarf zu identifizieren. Dies leistet einen Beitrag zu einem ganzheitlichen Verständnis der Kontrollübergabe von Fahrzeug zu Fahrer, welches für die Entwicklung zukünftiger hochautomatisierter Systeme grundlegend ist.

## Abstract

The introduction of conditionally automated driving systems, which take over lateral as well as longitudinal vehicle control, is expected within this decade (Cacilo et al., 2015; Underwood, 2015). Contrary to lower levels of automation, drivers no longer have to monitor the system or the environment. This enables them to engage in non-driving related tasks. However, the driver must still be able to regain vehicle control, if necessary (SAE International, 2014). The process of driver take-over is thus one of the most safety-critical aspects of conditionally automated driving. The aim of the present study is to examine driver take-over, as well as the effects of the driver engaging in non-driving related tasks on this process. Even though increasing attention was given to this topic over the past few years, findings do not, so far, provide a uniform picture. While some studies found deteriorated take-over performance (e.g. Körber et al., 2016), others reported an increase in alertness due to the engagement in non-driving related tasks (e.g. Neubauer et al., 2012).

In this thesis, these research questions will be examined based on three driving simulator studies. The aim of study 1 was to identify the physical and cognitive processes of driver take-over during conditionally automated driving. In study 2, the influence of different naturalistic non-driving related tasks on the process of driver take-over was analyzed. One of these tasks was selected for study 3, where the degree of visual-cognitive as well as manual task load was varied systematically. The results indicate that besides characteristics of the non-driving related task, there are also situational factors that determine the effects of driver distraction. Manual task load, i.e. handling an object, was found to delay reaction times and to deteriorate take-over quality. As expected, these effects were more pronounced in a steering compared to a braking maneuver. The influence of cognitive task load appears to be more complex. If situational demands are low, distracted drivers might be able to react about as fast as non-distracted drivers. High situational demands might lead, together with the additional cognitive load of a secondary task, to interferences and deteriorated take-over performance.

The present findings provide insights into how non-driving related tasks influence drivers' ability to resume vehicle control. Based on this, further research questions can be identified. Thereby, a contribution is made to a holistic understanding of the transition of control from the vehicle to the driver, which is vital for the development of future conditionally automated systems.

## 1 Einleitung

Some day in the future when you drive onto a superhighway, you'll reach over to your dashboard and push the button marked 'Electronic Drive.' Selecting your lane, you'll settle back to enjoy the ride as your car adjusts itself to the prescribed speed. You may prefer to read or carry on a conversation with your passengers – or even to catch up on your office work. It makes no difference for the next several hundred miles as far as the driving is concerned. (*Electronic Highway of the Future*, 1958, S. 18)

Die Vision des selbstfahrenden Fahrzeuges ist nicht neu. In unserer Gesellschaft, in der räumliche Flexibilität eine immer wichtigere Rolle spielt, wird dieser Trend die Mobilität der Zukunft grundlegend verändern. So erwartete das oben zitierte Wissenschaftsmagazin *Science Digest* bereits vor beinahe 60 Jahren, dass selbstfahrende Fahrzeuge den Passagieren eines Tages eine effizientere und komfortablere Nutzung ihrer Fahrtzeit ermöglichen. Heute wird angenommen, dass fahrerlose Autos der Zukunft auch körperlich eingeschränkten Personen, wie blinden oder alten Menschen, eine erweiterte Teilnahme am Verkehrsgeschehen erlauben werden. Bis diese Vision Realität wird, bedarf es allerdings noch weiterer technologischer und infrastruktureller Fortschritte sowie Anpassungen des gesetzlichen Rahmens. Seit die ersten automatisierten Fahrzeuge in den 80er und 90er Jahren zu Forschungszwecken entwickelt wurden (Dickmanns et al., 1994; Leighty, 1986), ist bei den verfügbaren Fahrerassistenzsystemen ein steter Zuwachs im Automationsgrad zu verzeichnen. Nichtsdestotrotz wird der Fahrer noch immer als Rückfallebene benötigt und muss in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen, falls ein Fahrereingriff erforderlich ist. Dies gilt auch für die nächste Stufe des hochautomatisierten Fahrens, das voraussichtlich noch innerhalb dieses Jahrzehnts technische Reife erlangen wird (Cacilo et al., 2015; Underwood, 2015). Die fortschreitende Automatisierung der Fahraufgabe bringt dabei Herausforderungen mit sich. Die Rolle des Fahrers verändert sich grundlegend; dieser wird vom aktiven Operator mehr und mehr zum passiven Überwacher des Systems. V.a. aus Bereichen wie der Luftfahrt oder dem Schienenverkehr, in denen traditionell eine starke Automatisierung vorliegt, gibt es viele Hinweise, dass Menschen für die Ausführung reiner Überwachungsaufgaben nur bedingt geeignet sind (Mackworth, 1950; Wiener & Curry, 1980). Bereits 1983 sprach Lianne Bainbridge von den „Ironies of Automation“: Häufig werden v.a. routinemäßig ausführbare Aufgaben automatisiert. Die eigentlich kritischen Aspekte hingegen, wie die Erkennung und Bewältigung von Ausnahmefällen, obliegen nach wie vor

dem menschlichen Akteur. Der Einfluss von Automation auf Zustand und Reaktionsbereitschaft des Fahrers wurde für einige Assistenzsysteme, wie z.B. den Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC) bereits in diversen Studien untersucht (z.B. Ma & Kaber, 2005; Rudin-Brown & Parker, 2004; Stanton & Young, 2005). Für die nächste Stufe der Hochautomatisierung liegt jedoch noch deutlicher Forschungsbedarf vor.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Fähigkeit des Fahrers zur manuellen Übernahme der Fahraufgabe während des hochautomatisierten Fahrens zu untersuchen. Da Hochautomation als erster Automationsgrad die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten während des Fahrens grundsätzlich ermöglicht, wird der Fokus auf die Beeinflussung der Übernahmeleistung durch Fahrerablenkung gelegt. Dabei werden naturalistische Tätigkeiten eingesetzt, um eine hohe ökologische Validität zu gewährleisten. Im Rahmen von Studie 1 sollen zunächst der Fahrerübernahme zugrunde liegende motorische und kognitive Prozesse identifiziert und der zeitliche Ablauf der Fahrerübernahme modellhaft dargestellt werden. Weiter wird der Fragestellung nachgegangen, ob es Maße gibt, anhand derer sich bereits vor Eintreten einer Übernahme-situation Rückschlüsse auf die Übernahmebereitschaft der Fahrer ziehen lassen. Da klassische Fahrleistungsparameter, wie z.B. die Spurhaltungsgüte, während hochautomatisiertem Fahren nicht auf den Fahrer zurückzuführen sind, wird zu diesem Zweck das Blickverhalten der Fahrer auf einen Zusammenhang mit deren Übernahmeleistung untersucht. In den Studien 2 und 3 sollen dann verschiedene fahrfremde Tätigkeiten untersucht werden, auf Basis derer die Stärke visuell-kognitiver sowie manueller Beanspruchung des Fahrers systematisch variiert werden kann. Dadurch soll der Einfluss fahrfremder Tätigkeiten auf die in Studie 1 aufgestellten Prozesse untersucht werden, um die hierzu abgeleiteten Annahmen zu replizieren und validieren.

In den folgenden Kapiteln wird der theoretische Hintergrund für die Untersuchung dieser Fragestellungen behandelt. Hierfür werden zunächst grundlegende psychologische Konzepte erläutert (Kapitel 1.1) und Befunde zu den Auswirkungen von Fahrerablenkung während des manuellen Fahrens dargelegt (Kapitel 1.2). Weiter werden Definitionen verschiedener Automationsgrade von Assistenzsystemen und bekannte Automationseffekte beschrieben, wobei besonderer Fokus auf hochautomatisierte Systeme und die Rückübernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer gelegt wird (Kapitel 1.3).

## ***1.1 Psychologische Grundlagen des Autofahrens***

Autofahren ist eine äußerst komplexe Aufgabe, die die ständige Koordination einer Vielzahl perzeptueller, kognitiver und motorischer Prozesse erfordert. Als zentrale Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung können dabei sensorische Verarbeitung, Wahrnehmung sowie

Handlungsauswahl und -durchführung unterschieden werden (Wickens, Hollands & Parasuraman, 2016). Hierbei findet eine komplexe Interaktion mit den Aufmerksamkeitsressourcen und Gedächtnisinhalten des Fahrers statt, die dessen Erfahrungen, Ziele und Erwartungen beinhalten. In den folgenden Kapiteln werden zentrale Bestandteile des Informationsverarbeitungsprozesses beschrieben, die für das Autofahren im Allgemeinen, aber auch für Fahrerablenkung sowie Automation im Speziellen relevant sind.

### **1.1.1 Aufmerksamkeit und Wahrnehmung**

Ein Großteil der relevanten Informationen während des Autofahrens wird visuell erworben (Cohen & Hirsig, 1991; Sivak, 1996). Vor allem der visuellen Aufmerksamkeitsausrichtung kommt daher für die Informationsaufnahme und -verarbeitung während des Autofahrens eine entscheidende Rolle zu. Unterschiedliche Formen der Aufmerksamkeit sind dabei in verschiedenen Anwendungsfällen von besonderer Relevanz. Zunächst wird Aufmerksamkeit häufig als Selektionsmechanismus beschrieben, der darüber entscheidet, welche Stimuli wie schnell und tief verarbeitet werden. Dabei kann zwischen zwei Mechanismen der visuellen Aufmerksamkeitsausrichtung unterschieden werden (Corbetta & Shulman, 2002; Egeth & Yantis, 1997). Aufmerksamkeit kann einerseits, bestimmt durch individuelle Erwartungen, Ziele und Wissen, gezielt auf bestimmte Reize gerichtet werden (Top-down-Verarbeitung), andererseits aber auch reizgesteuert und unwillkürlich auf saliente Objekte gelenkt werden (Bottom-up-Verarbeitung; Wickens, Goh, Helleberg, Horrey & Talleur, 2003). Selektive Aufmerksamkeit spielt beim Autofahren eine zentrale Rolle, da der Fahrer die Fahrumgebung in seiner Komplexität vermutlich nie vollständig wahrnehmen kann und aus der Vielzahl miteinander konkurrierender Reize relevante Stimuli herausfiltern muss. Durch die Zuwendung von Aufmerksamkeit auf bestimmte situative Bestandteile können diese vom Fahrer wahrgenommen und bewusst verarbeitet werden.

Im Gegensatz zum manuellen Fahren liegt während des automatisierten Fahrens, wenn die Aufgabe der Fahrer teilweise oder vollständig aus der Überwachung des Systems besteht (siehe Kapitel 1.3), eine eher monotone Situation mit geringem Anteil relevanter Stimuli vor. Hier ist weniger das Herausfiltern relevanter Reize entscheidend, als vielmehr das Aufrechterhalten der Aufmerksamkeit über einen längeren Zeitraum, was als *Vigilanz* bezeichnet wird (Matthews, 2000). Dies stellt für Menschen eine Herausforderung dar; bereits innerhalb der ersten 30 Minuten kommt es häufig zu einer Abnahme der *Vigilanz*, die sich in einer verminderten Entdeckungsrate relevanter Reize niederschlägt (Helton, Dember, Warm & Matthews, 1999; Mack-

worth, 1948; Teichner, 1974). Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass der Grund für diesen Vigilanzabfall eine abnehmende Wachsamkeit aufgrund geringer kognitiver Anforderungen ist (Frankmann & Adams, 1962). Studien konnten jedoch zeigen, dass Vigilanzaufgaben mit einem erhöhten Stresslevel und gesteigerter kognitiver Beanspruchung assoziiert sind (Warm, Dember & Hancock, 1996; Warm, Parasuraman & Matthews, 2008). Beeinträchtigungen der Vigilanz scheinen demnach aus einer Ermüdung durch die kontinuierliche Beanspruchung kognitiver Ressourcen zu resultieren (Wickens et al., 2016).

Eine weitere Form der Aufmerksamkeit ist im Zusammenhang mit Fahrerablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten relevant (siehe Kapitel 1.2): Geteilte Aufmerksamkeit beschreibt die Fähigkeit einer Person, zwei oder mehr Aufgaben gleichzeitig auszuführen (Matthews, 2000). Dies führt aufgrund der gesteigerten Anforderungen üblicherweise zu einer erhöhten Fehlerrate und längeren Bearbeitungsdauern. Geteilte Aufmerksamkeit ist eng mit sogenannten Ressourcen- oder Kapazitätsmodellen assoziiert, die davon ausgehen, dass die menschlichen Aufmerksamkeits- und Informationsverarbeitungsressourcen begrenzt sind (Kahneman, 1973). Werden diese kognitiven Kapazitäten überschritten, kann es zu einer inadäquaten Verarbeitung und Leistungsverschlechterungen kommen. In diesem Zusammenhang spielt auch das Konzept des Workloads eine wichtige Rolle, auf das im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

### **1.1.2 Workload**

Unter Workload wird meist die Arbeitsbeanspruchung eines Individuums während der Ausführung einer bestimmten Aufgabe verstanden, die über die Auslastung dessen kognitiver Ressourcen bestimmt wird. Wickens (2002) beschreibt Workload als das Verhältnis zwischen den durch eine bestimmte Aufgabe beanspruchten und den zur Verfügung stehenden Ressourcen. Workload ist damit keine objektive Eigenschaft der Aufgabe, sondern hängt von mehreren Faktoren wie den Aufgabenanforderungen, den situativen Umständen und den Fähigkeiten und Eigenschaften des Handelnden ab (Hart & Staveland, 1988). Wickens (1980, 1984) geht in seinem multiplen Ressourcenmodell davon aus, dass es nicht eine, sondern verschiedene kognitive Ressourcen gibt, die simultan genutzt werden können. Das Modell unterscheidet vier unabhängige Dimensionen, für die separate Ressourcen existieren (Abbildung 1): (1) die Verarbeitungsstufe (Enkodierung, zentrale Verarbeitung, Reaktion), (2) die Modalität der wahrgenommenen Informationen (auditiv, visuell), (3) die Kodierung der wahrgenommenen Informationen (räumlich/analog, sprachlich) und (4) die Art der erforderlichen Reaktion (motorisch, sprachlich). Da jede dieser Ressourcen begrenzt ist, ist die Interferenz zwischen zwei Aufgaben umso größer, je stärker diese dieselben Ressourcen beanspruchen (Wickens, 2002). Das Modell soll v.a. für

Situationen mit hohem Workload, in denen der Akteur zwei oder mehr Aufgaben gleichzeitig ausführt, Leistungsvorhersagen machen (Wickens, 2002). Aus diesem Grund wird es zur Erklärung und Vorhersage der Auswirkungen von Fahrerablenkung durch die Ausführung von Mehrfachaufgaben im Fahrkontext häufig herangezogen.

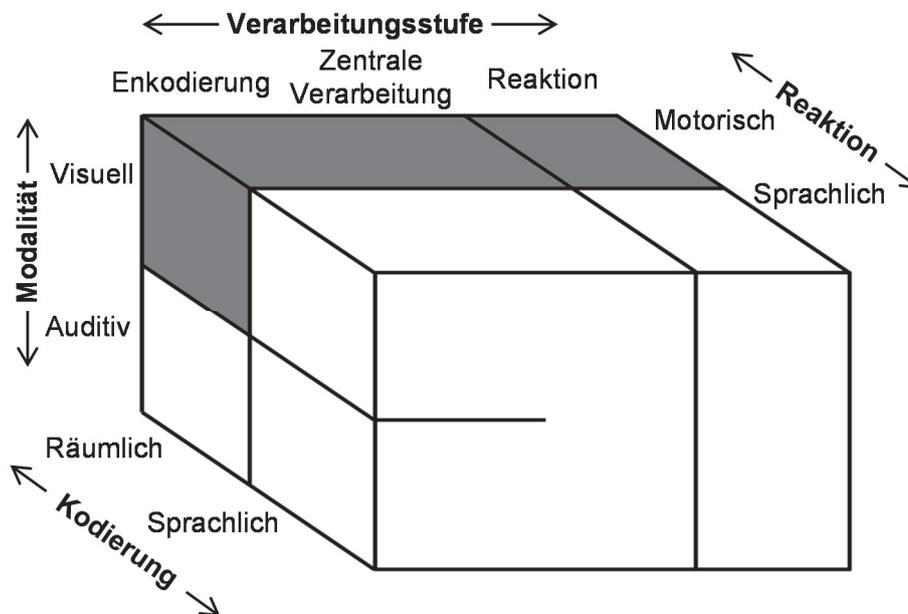


Abbildung 1. Multiples Ressourcenmodell nach Wickens (2002). Die beim Autofahren besonders beanspruchten Ressourcen sind grau markiert.

Beim Autofahren handelt es sich um eine Tätigkeit mit überwiegend visuellem Input, räumlicher Kodierung und motorischen Reaktionen (siehe Abbildung 1). Das Modell nach Wickens würde also beispielsweise für die Bedienung einer interaktiven Karte starke Interferenzen mit der Fahraufgabe vorhersagen, da beide Tätigkeiten zu großen Teilen dieselben Ressourcen beanspruchen. Beim Musikhören oder dem Führen eines Gespräches hingegen handelt es sich um auditiven Input, der sprachlich kodiert ist und ggf. eine verbale Reaktion erfordert, was zu geringen Ressourcenkonflikten führen sollte (Befunde zu Nebentätigkeiten während des Autofahrens werden im Detail in Kapitel 1.2 dargelegt). Werden relevante Bestandteile der Situation aufgrund einer Überschreitung der zugänglichen Ressourcen nicht angemessen wahrgenommen oder verarbeitet, wirkt sich dies auch auf weiterführende kognitive Prozesse aus. Um in einer komplexen Umgebung wie dem Straßenverkehr adäquat agieren und reagieren zu können, ist eine angemessene Interpretation der aufgenommenen Informationen notwendig, um eine kohärente mentale Repräsentation der Situation zu erlangen. In diesem Zusammenhang wird häufig auf das Konzept des Situationsbewusstseins zurückgegriffen.

### 1.1.3 Situationsbewusstsein

Der Begriff des Situationsbewusstseins stammt ursprünglich aus dem Bereich der Luftfahrt (Endsley, 1995a, 1995b; Kaber & Endsley, 2004). Die wohl am weitesten verbreitete Definition stammt von Endsley (1995b), nach der Situationsbewusstsein die Wahrnehmung der in einer Situation enthaltenen Elemente, das Verständnis deren Bedeutung sowie deren Projektion in die nahe Zukunft umfasst. Das Modell beinhaltet demnach drei hierarchische Ebenen, die zu einer gesamtheitlichen mentalen Repräsentation der Situation beitragen (siehe Abbildung 2).

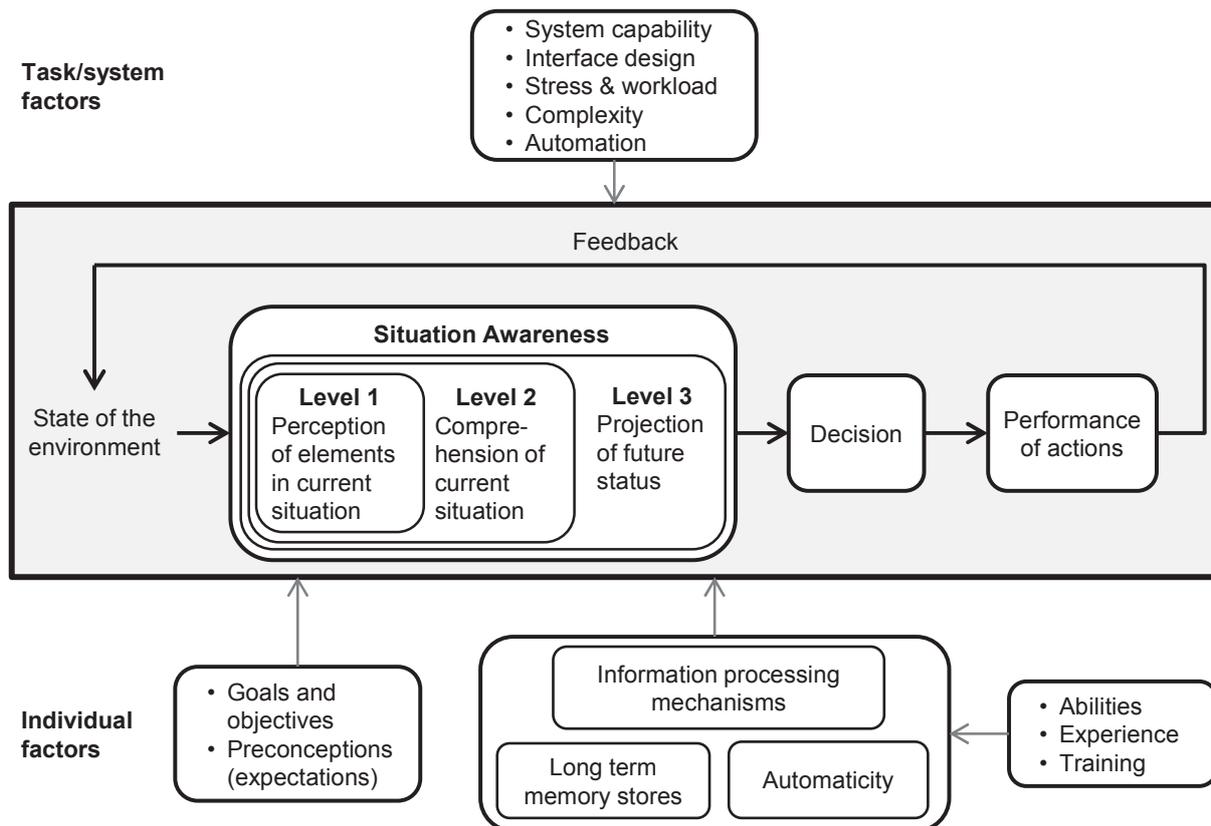


Abbildung 2. Modell des Situationsbewusstseins nach Endsley (1995b).

Level 1 umfasst die Wahrnehmung der einzelnen, für den Akteur relevanten Elemente in einer Situation (z.B. das Blinken des Vorderfahrzeugs). Diese werden in Level 2 zu einer zusammenhängenden mentalen Repräsentation der Situation zusammengefasst, wodurch der Handelnde ein Verständnis der Situation erlangt (z.B. die Intention des Vorderfahrzeugs abzubiegen). Die dritte und höchste Ebene des Situationsbewusstseins beinhaltet die Projektion der Situation und der darin enthaltenen Elemente in die nahe Zukunft (z.B. das Vorderfahrzeug wird für den Abbiegevorgang vermutlich seine Geschwindigkeit reduzieren). Level 3 stellt ein zentrales Merkmal dieses Modells dar und verdeutlicht, weshalb es für stark dynamische Situationen wie den

Luft- oder Straßenverkehr gut geeignet ist. Um angemessen agieren zu können, muss der Handelnde in der Lage sein, Verhalten und Zustand der in der Situation enthaltenen Elemente zu antizipieren (Endsley, 1995b). Basierend auf diesem mentalen Situationsmodell kann dann eine Handlung ausgewählt und ausgeführt werden (z.B. könnte der Fahrer ebenfalls seine Geschwindigkeit reduzieren). Handlungsauswahl und -durchführung können nach Endsley (1995b) jedoch auch von weiteren personen- oder aufgabenabhängigen Faktoren beeinflusst werden, wie z.B. Erfahrungen, Fähigkeiten und Zielen des Handelnden, oder der Komplexität der Aufgabe (siehe Abbildung 2).

Das Konzept des Situationsbewusstseins wird aufgrund des hohen Abstraktionsgrades und der inhaltlichen Breite kontrovers diskutiert, da dies eine präzise Definition erschwert und die Messbarkeit des Konstruktes einschränkt (Buld, Tietze & Krüger, 2005; Flach, 1995). So wurde Situationsbewusstsein auch ein „Folk Model“ genannt, dessen Begriff für die Erklärung komplexer Verhaltensweisen eingeführt wurde, sich aber einer empirischen Grundlage entzieht (Dekker & Hollnagel, 2004; Dekker & Woods, 2002). Vor allem im Zusammenhang mit Automation gibt es jedoch eine Vielzahl empirischer Befunde zum Situationsbewusstsein, die das Erklärungspotenzial dieses Konstruktes unterstreichen (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2008). Auch die Ausführung von Nebentätigkeiten scheint einen Einfluss auf das Situationsbewusstsein auszuüben, was in den folgenden Kapiteln dargelegt wird.

## ***1.2 Fahrerablenkung durch fahrfremde Tätigkeiten***

Eine Vielzahl von Studien belegt den massiven Einfluss von Fahrerablenkung auf die Verkehrssicherheit beim manuellen Fahren (z.B. Engström, Johansson & Östlund, 2005; Greenberg et al., 2003; Horrey & Wickens, 2007; Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks & Ramsey, 2006). Doch trotz der intensiven Forschung zu Fahrerablenkung fehlte hierzu lange Zeit eine allgemein anwendbare Definition (Foley, Young, Angell & Domeyer, 2013; Regan, Hallett & Gordon, 2011). Unter „Ablenkung“ wird im Allgemeinen meist die Abwendung der Aufmerksamkeit von der Hauptaufgabe verstanden. Regan et al. (2011) definieren Fahrerablenkung als die Abwendung der Aufmerksamkeit von der Fahraufgabe hin zu einer konkurrierenden Tätigkeit, sodass unzureichend Aufmerksamkeit auf den für die Verkehrssicherheit relevanten Handlungen liegt. Brown (1994) unterscheidet dabei zwischen selektiver und allgemeiner Aufmerksamkeitsabwendung. Selektive Aufmerksamkeitsabwendung beschreibt den Zustand, bei dem der Fahrer seinen Blick zwar auf die Straße gerichtet hat, in seiner kognitiven Verarbeitung aber eingeschränkt ist. Grund hierfür kann eine zu hohe mentale Beanspruchung sein, z.B. durch

Gespräche mit dem Beifahrer, oder auch Tagträumen. Zu allgemeiner Aufmerksamkeitsabwendung kommt es, wenn der Fahrer seinen Blick von der Straße abwendet oder die Augen schließt, was zu einer verminderten Informationsaufnahme führt. Diese Zustände werden daher auch als „Mind-off-the-road“ und „Eyes-off-the-road“ bezeichnet (P. Green, 2000). Tijerina (2000) unterscheidet darüber hinaus biomechanische Interferenz als dritte Art der Fahrerablenkung. Diese entsteht durch das Verlassen einer normalen Sitzposition, z.B. beim Greifen nach etwas oder dem Halten eines Gegenstandes in den Händen.

Auch wenn diese verschiedenen Arten von Ablenkung zunächst alle den Workload des Fahrers erhöhen, wird angenommen, dass sie unterschiedliche Auswirkungen auf den Fahrer und seine Fahrleistung haben (Brown, 1994). Den Annahmen des multiplen Ressourcenmodells entsprechend sollte eine visuelle Nebentätigkeit zu größeren Interferenzen mit der Fahraufgabe führen als rein kognitive Ablenkung (siehe Kapitel 1.1.2). Durch die zusätzliche visuelle Beanspruchung kann es demnach zu einer Überschreitung der verfügbaren Kapazitäten und infolgedessen zu Leistungseinbußen kommen. Und tatsächlich liefert eine Vielzahl von Studien Hinweise darauf, dass sich kognitiv-auditive und visuelle Fahrerablenkung auf die Fahrzeugführung und das Blickverhalten des Fahrers unterschiedlich auswirken, wie im Folgenden dargestellt wird.

### ***1.2.1 Auswirkungen kognitiver und auditiver Ablenkung***

Die Ausführung vorwiegend kognitiv oder auditiv beanspruchender fahrfremder Tätigkeiten während des manuellen Autofahrens, z.B. Telefonieren mit Freisprecheinrichtung oder Gespräche mit dem Beifahrer, führen zwar grundsätzlich nicht zu einer Abwendung der visuellen Aufmerksamkeit von der Straße, beeinflussen aber dennoch das Blickverhalten des Fahrers. So wurde bei Fahrern mit derartiger Nebentätigkeit im Vergleich zu Fahrern ohne Nebentätigkeit eine verringerte Blickrichtungsvariabilität gefunden. Fahrer richten ihren Blick verstärkt auf den Bereich der Straßenmitte und weniger auf die Randbereiche der Fahrszene (Engström et al., 2005; Nunes & Recarte, 2002; Victor, 2005). Weiter weisen kognitiv abgelenkte Fahrer längere Fixationsdauern und eine geringere Anzahl von Sakkaden auf, was einen erhöhten Verarbeitungsaufwand und eine verringerte Aufnahmezeit widerspiegelt (Harbluk, Noy & Eizenman, 2002). Auch die Anzahl von Kontrollblicken in Seiten- und Rückspiegel nimmt durch kognitive Ablenkung ab (Harbluk et al., 2002; Nunes & Recarte, 2002). Mit diesen Veränderungen scheint ein reduziertes Situationsbewusstsein der Fahrer einherzugehen (Ma & Kaber, 2005). Dabei wurden v.a. Einschränkungen in Verständnis und Antizipation der Situation gefunden und weniger in der Wahrnehmung der Situation (Rogers, Zhang, Kaber & Liang, 2011).

Dies äußert sich Studien zufolge in einer schlechteren Erkennungsleistung von sicherheitsrelevanten Ereignissen und verzögerten Reaktionen (Horrey & Wickens, 2006; Recarte & Nunes, 2003; Victor, 2005). Im Gegensatz hierzu wird die Spurführungsleistung durch kognitiv-auditive Ablenkung nicht beeinträchtigt, oder, wie einige Studien implizieren, sogar verbessert (Engström et al., 2005; Horrey & Wickens, 2006; Jamson & Merat, 2005; Oron-Gilad, Ronen & Shinar, 2008). Grund hierfür ist vermutlich, dass für die Erkennung und Kontrolle der Spurmarkierungen periphere visuelle Wahrnehmung zu großen Teilen ausreicht, die auch beim Fokussieren des Blickes auf die Straßenmitte noch vorliegt (Victor, Harbluk & Engström, 2005).

Zusammengefasst beeinflusst eine zusätzliche kognitive Beanspruchung des Fahrers in bestimmtem Maße die Informationsaufnahme, vor allem jedoch die kognitive Verarbeitung, was zu einer beeinträchtigten Erkennung von Gefahrensituationen führt. Nichtsdestotrotz sind Nebentätigkeiten, die rein kognitiv beanspruchend sind, wie z.B. das Telefonieren mit Freisprecheinrichtung, in Deutschland während des Autofahrens nicht verboten. Anders ist dies für Tätigkeiten, die eine starke Abwendung des Blickes von der Straße mit sich bringen, wie der Bedienung eines Mobiltelefons. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit den Auswirkungen visueller Ablenkung während des Autofahrens.

### **1.2.2 Auswirkungen visueller Ablenkung**

Die Ausführung visueller Nebentätigkeiten, wie z.B. das Bedienen eines Navigationsgerätes oder das Ablesen einer Anzeige, führt zunächst zu einer deutlichen Blickabwendung von der Straße. Victor (2005) ließ Probanden während des manuellen Fahrens visuell beanspruchende Tätigkeiten ausführen (z.B. Ablesen der Motoranzeige, Einstellen eines Radiosenders, Wählen einer Telefonnummer) und fand einen durchschnittlich auf etwa 30% reduzierten Anteil von Blicken auf die Straßenmitte im Vergleich zu etwa 80% während des Fahrens ohne Nebentätigkeit. Neben dieser allgemeinen Abwendung visueller Aufmerksamkeit vom Verkehrsgeschehen konzentrieren sich die verbleibenden Blicke auf die Straße auf einen kleineren Ausschnitt der Straßenmitte (Victor, 2005). Bestimmte Blickverhaltensparameter differenzieren darüber hinaus zwischen verschiedenen Ablenkungsgraden. Studien fanden mit zunehmender visueller Aufgabenschwierigkeit einen Anstieg in Dauer und Häufigkeit der Blicke auf die Nebentätigkeit sowie eine Abnahme der Blickzuwendungen zur Straßenmitte (Green, 1999; Peng, Boyle, Ghazizadeh & Lee, 2013; Victor et al., 2005). Auch die maximale Blickabwendungsdauer von der Straße und die Anzahl der Blickabwendungen mit einer Dauer von mehr als 2 s, was als besonders sicherheitskritisch betrachtet wird (National Highway Traffic Safety Administration,

2012), steigt mit zunehmender Aufgabenschwierigkeit an (Peng et al., 2013; Victor et al., 2005).

Es wird angenommen, dass diese Beeinträchtigungen im Blickverhalten den Aufbau einer mentalen Repräsentation der Situation erschweren, wobei nicht nur Verständnis und Antizipation der Situation, sondern bereits die Wahrnehmung beeinträchtigt wird (Rogers et al., 2011). Dies führt zu einer schlechteren Erkennungsrate kritischer Umgebungsreize (Greenberg et al., 2003; Horberry, Anderson, Regan, Triggs & Brown, 2006) und ist mit einem erhöhten Unfallrisiko assoziiert. In Fahr Simulator- und Realfahrstudien konnte ein enger Zusammenhang zwischen visueller Ablenkung und der Wahrscheinlichkeit, in einen Unfall verwickelt zu werden, nachgewiesen werden (Horrey & Wickens, 2007; Klauer et al., 2006). So ergab die vielfach zitierte „100-Car Naturalistic Driving Study“ (Dingus et al., 2006), dass Fahrer in etwa 80% aller Unfälle kurz vor dem Ereignis den Blick nicht auf die Straße gerichtet hatten. Im Unterschied zu kognitiver Ablenkung interferieren visuelle Nebentätigkeiten darüber hinaus auch stark mit der Fahrzeugführung. Während der Ausführung visueller Nebentätigkeiten wurden eine erhöhte Varianz der Spurführung sowie eine größere Anzahl von Lenkkorrekturen festgestellt (Engström et al., 2005; Green, 1999; Greenberg et al., 2003; Jamson & Merat, 2005). Fahrer passen jedoch ihr Fahrverhalten in kompensatorischer Weise an einen erhöhten Workload an: Studien fanden infolge visueller Ablenkung eine reduzierte Geschwindigkeit (Engström et al., 2005; Horberry et al., 2006; Jamson & Merat, 2005) sowie einen größeren Abstand zum Vorderfahrzeug (Kaber, Liang, Zhang, Rogers & Gangakhedkar, 2012).

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass bereits eine Vielzahl von Forschungsergebnissen zu den Auswirkungen von Fahrerablenkung während des manuellen Fahrens vorliegt. Da Fahrer sich mit steigendem Automationsgrad verstärkt fahrfremden Tätigkeiten zuwenden (siehe Kapitel 1.3.3.2), ist dieses Thema für automatisiertes Fahren von mindestens ebenso großer Relevanz wie für das nicht-automatisierte Fahren. Es ist jedoch unklar, inwiefern Erkenntnisse zum manuellen Fahren auf automatisiertes Fahren übertragen werden können, da sich hierbei die Rolle des Fahrers und die an ihn gestellten Anforderungen grundsätzlich ändern. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit Automation im Fahrkontext. Zunächst werden Klassifizierungen automatisierter Fahrfunktionen dargestellt (Kapitel 1.3.1) und bekannte Automationseffekte im Fahrkontext beschrieben (Kapitel 1.3.2). Dabei wird vor allem auf hochautomatisierte Systeme und den Prozess der Fahrerübernahme genauer eingegangen (Kapitel 1.3.3).

## **1.3 Automation im Fahrkontext**

### **1.3.1 Automationsgrade von Fahrerassistenzsystemen**

Eine der ersten Klassifizierungen automatisierter Fahrfunktionen wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vorgenommen (Gasser et al., 2012). Hierin werden neben dem nicht-automatisierten Fahren vier Automationsgrade unterschieden.

- (0) Während des nicht-automatisierten Fahrens führt der Fahrer dauerhaft die Quer- und Längsführung aus und ist in alleiniger Verantwortung für die Fahrzeugsteuerung. Systeme dieses Automationsgrades können rein informierend oder warnend sein, wie z.B. Totwinkel- oder Müdigkeitswarner.
- (1) Beim assistierten Fahren wird entweder die Quer- oder die Längsführung automatisiert ausgeführt. Beispiele hierfür sind ACC oder Parklenkassistentz (Übernahme der Lenkung bei der Ausführung von Parkmanövern, während der Fahrer Gas und Bremse betätigt).
- (2) Teilautomatisierte Systeme übernehmen sowohl Quer- als auch Längsführung, der Fahrer muss jedoch System und Umwelt weiterhin ständig überwachen (z.B. ACC + aktiver Spurhalteassistent).
- (3) Hochautomatisierte Fahrfunktionen übernehmen die Fahrzeugführung ebenfalls für einen gewissen Zeitraum vollständig. Ein zentraler Unterschied zur Teilautomation besteht darin, dass der Fahrer das System und die Umwelt nicht mehr dauerhaft überwachen muss und sich daher der Ausführung fahrfremder Tätigkeiten zuwenden kann. Hierbei ist wichtig anzumerken, dass dies lediglich die Systemausprägung beschreibt, nicht jedoch die aktuelle Gesetzeslage widerspiegelt. Das System erkennt alle Situationen, die es nicht handhaben kann, selbständig und fordert den Fahrer vor Erreichen einer solchen Systemgrenze mit ausreichend Zeitreserve zur Übernahme auf. Dieser muss daraufhin in der Lage sein, die Fahrzeugführung innerhalb des vorgegebenen Zeitfensters wieder vollständig und adäquat zu übernehmen.
- (4) Die gemäß der BASt höchste Stufe der Vollautomation übernimmt die Fahrzeugführung innerhalb eines bestimmten Anwendungsfalles, z.B. auf der Autobahn, vollständig und dauerhaft. Eine Übernahme durch den Fahrer ist nur bei Verlassen des Anwendungsfalles nötig, wobei das System bei Ausbleiben der Fahrerübernahme in der Lage ist, den risikominimalen Zustand herbeizuführen. Der Fahrer ist dadurch innerhalb des Anwendungsfalles nicht mehr zwangsläufig als Rückfallebene erforderlich.

Eine weitere, international gängige Nomenklatur stammt von SAE International (2014). Die im Rahmen dessen definierten Automationsgrade entsprechen weitestgehend denen der BASt; eine Übersicht beider Taxonomien findet sich in Tabelle 1. In den englischsprachigen Veröffentlichungen zur vorliegenden Arbeit wird teilweise der Begriff des „highly automated driving“ und teilweise der des „conditionally automated driving“ verwendet. Grund hierfür ist, dass sich der aus SAE International (2014) entnommene Begriff des „conditionally automated driving“ in der englischsprachigen Literatur erst im Laufe der vorliegenden Arbeit durchsetzte. Alle Veröffentlichungen beziehen sich jedoch auf dieselbe Stufe der Hochautomation nach Gasser et al. (2012).

Tabelle 1. Rolle von Fahrer und System bei verschiedenen Automationsgraden nach der BASt (Gasser et al., 2012) und SAE International (2014). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit hochautomatisierten Systemen.

	BASt	Nicht automatisiert	Assistiert	Teilautomatisiert	Hochautomatisiert	Vollautomatisiert	-
	SAE	No Automation	Driver Assistance	Partial Automation	Conditional Automation	High Automation	Full Automation
System	Ausführung Längs-/Querführung	nein	längs oder quer	längs und quer	längs und quer	längs und quer	längs und quer
	Verfügbarkeit des Systems	-	zeitweise in bestimmter Situation	zeitweise in bestimmter Situation	zeitweise in bestimmter Situation	immer in bestimmter Situation	immer
	Erkennt alle Systemgrenzen	-	nein	nein	ja	ja	ja
Fahrer	Fahrer als Rückfallebene erforderlich	-	ja	ja	ja	nein	nein
	Bereitschaft zur Übernahme	-	jederzeit	jederzeit	mit ausreichend Zeitreserve	mit ausreichend Zeitreserve	nicht nötig
	Überwachung (Umwelt/System)	dauerhaft	dauerhaft	dauerhaft	nicht nötig	nicht nötig	nicht nötig
	Ausführung einer Nebentätigkeit	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	begrenzt möglich	möglich	möglich
	Beispiele	Totwinkel-, Müdigkeitswarner	ACC, Parklenkassistent	ACC + aktive Spurführung	„Autobahnchauffeur“	„Autobahnchauffeur Plus“	fahrerloses Fahren

Systeme, die sowohl die Längs- als auch die Querführung automatisiert ausführen, haben vor wenigen Jahren Serienreife erlangt und sind z.B. in der Mercedes-Benz S-Klasse (W222) seit 2013 oder im Tesla Model S seit 2015 verfügbar. Hochautomatisierte Systeme befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstand; entsprechend einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie werden diese jedoch bis zum Jahr 2020 erwartet (Cacilo et al., 2015). Dabei werden die ersten hochautomatisierten Fahrfunktionen voraussichtlich für

Fahrten auf der Autobahn ausgelegt sein. Hier stellen zwar hohe Geschwindigkeiten und damit verbunden eine relativ kurze zeitliche Vorausschau der Sensorik Herausforderungen dar, allerdings sind die situativen Bestandteile dieses Anwendungsfalls besser präzifizierbar und weniger komplex als dies beispielsweise im urbanen Umfeld der Fall ist. Der Fahrer kann seine Aufmerksamkeit erlaubterweise vom Verkehrsgeschehen abwenden, muss jedoch die Fahrzeugführung immer noch übernehmen können. Dadurch wird der Prozess der Fahrerübernahme zum zentralen sicherheitsrelevanten Aspekt hochautomatisierter Systeme, dem seit einigen Jahren in der Forschung und im Automobilbereich viel Aufmerksamkeit geschenkt wird. Es muss sichergestellt werden, dass der Fahrer die Fahrzeugführung angemessen übernehmen kann – auch für den Fall eines zuvor abgelenkten Fahrers. Zudem dürfen auch Automationseffekte, die im Fahrkontext bekannt sind, die Übernahmefähigkeit des Fahrers nicht gefährden. Diese werden im folgenden Abschnitt behandelt.

### ***1.3.2 Auswirkungen von Automation auf den Fahrer***

Automation bringt eine Verlagerung der primären Aufgabe des Fahrers von der Fahrzeugführung hin zur reinen Überwachung des Systems mit sich (Bainbridge, 1983; Wiener & Curry, 1980). Dies führt zu einer Entlastung des Fahrers; in Studien wurde bei Fahrten mit Assistenzsystemen ein geringerer Workload als bei Fahrten ohne unterstützende Systeme gefunden (Brookhuis, van Driel, Hof, van Arem & Hoedemaeker, 2008; Damböck, Weissgerber, Kienle & Bengler, 2013; Ma & Kaber, 2005). Dabei zeigte sich, dass vor allem die Automatisierung der Querführung und weniger die Automatisierung der Längsführung den Workload des Fahrers reduziert (de Winter, Happee, Martens & Stanton, 2014; Young & Stanton, 2007b). Allerdings scheint sich die Freisetzung kognitiver Ressourcen nicht unbedingt positiv auf das Überwachungsverhalten oder andere Leistungsmerkmale auszuwirken. Buld et al. (2005) fanden bei Fahrten mit ACC im Vergleich zu Fahrten ohne ACC eine Abnahme der subjektiv berichteten Vigilanz. Rudin-Brown und Parker (2004) berichten ebenfalls, dass Fahrer während der Nutzung von ACC ihre Aufmerksamkeit weniger auf die Fahraufgabe und verstärkt auf eine fahrfremde Tätigkeit richteten. Diese Folgen einer vorwiegenden Überwachungsaufgabe des Fahrers werden in der Literatur häufig mit dem sogenannten Out-of-the-loop-Phänomen in Zusammenhang gebracht: Der Fahrer ist kein aktiver Bestandteil der Fahrzeugführung mehr und weist infolgedessen ein verringertes Bewusstsein über den Zustand von System und Umwelt auf (Endsley & Kaber, 1999; Endsley & Kiris, 1995). Studien zeigen, dass Fahrer während automatisierter Fahrten infolgedessen Systemfehler oder Gefahrenstellen schlechter erkennen und später darauf reagieren (Buld et al., 2005; Merat & Jamson, 2009; Niederée & Vollrath, 2009; Vollrath, Schleicher & Gelau, 2011; Young & Stanton, 2007a).

Einige Autoren gehen davon aus, dass dieser Leistungsabfall infolge von Automation auf ein Verlust von Situationsbewusstsein zurückzuführen ist, da Automation den Aufbau eines mentalen Situationsmodells erschweren kann (Endsley & Kiris, 1995; Niederée & Vollrath, 2009). Tatsächlich berichten einige Autoren ein verringertes Situationsbewusstsein der Fahrer während automatisierter Fahrten im Vergleich zu manuellen Fahrten (Gugerty, 1997; Stanton & Young, 2005). De Winter et al. (2014) leiten basierend auf einer Metaanalyse stärker differenziert ab, dass die Nutzung von ACC und hochautomatisierter Systeme zu Beeinträchtigungen im Situationsbewusstsein führen kann, wenn sich die Fahrer während des Fahrens mit fahrfremden Tätigkeiten beschäftigen. Die explizite Aufforderung, die Umgebung zu betrachten, kann nach diesen Autoren allerdings auch zu einem besser ausgeprägten Situationsbewusstsein führen. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Auswirkungen von Automation ist dabei das Vertrauen des Fahrers in das System. Nach Parasuraman, Molloy und Singh (1993) wird infolge eines zu starken Vertrauens in die Automation die Kontrolle des Systems vernachlässigt und es kommt zu einer Aufmerksamkeitsverlagerung von den Überwachungsaufgaben auf andere Tätigkeiten. Paradoxerweise können sich dadurch v.a. Systeme mit hohem Zuverlässigkeitsgrad, in die der Akteur ein großes Vertrauen entwickelt, negativ auf dessen Leistung auswirken (Bailey & Scerbo, 2007; Muir & Moray, 1996). Tatsächlich konnte gezeigt werden, dass Fahrer beim Fahren mit ACC schneller reagieren, wenn das System eine geringere Zuverlässigkeit aufweist (Niederée & Vollrath, 2009).

An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Fahrerassistenzsysteme trotz der teilweisen Entkoppelung des Fahrers von der Fahraufgabe bei regulärer Funktionsweise ein großes Sicherheitspotenzial besitzen und die Verkehrssicherheit steigern können. So kommen Potenzialanalysen basierend auf realen Unfalldaten zu dem Schluss, dass ACC-Systeme über 30% aller Auffahrunfälle verhindern können (Hipp, Schwertberger & Gwehenberger, 2006; Schittenhelm, 2013). Dies liegt einerseits an der automatisierten Bremsung und dem damit einhergehenden warnenden Effekt auf den Fahrer. Andererseits wird ACC häufig mit Systemen zur Kollisionsvermeidung und -minderung kombiniert, da es eine große Überlappung in der erforderlichen Sensorik dieser Systeme gibt (Winner & Schopper, 2015). Auch für hochautomatisierte Systeme wurde ein sicherheitssteigernder Effekt nachgewiesen: In einer Fahrstudie wurde während nicht-automatisierten Fahrten deutlich häufiger ein sicherheitskritischer Mindestabstand zum Vorderfahrzeug unterschritten als dies während hochautomatisierten Fahrten der Fall war (Jamson, Merat, Carsten & Lai, 2013). Im Unterschied zu Systemen mit geringerem Automationsgrad besteht bei hochautomatisierten Systemen darüber hinaus die

zentrale Herausforderung weniger in der Gefahr, dass Gefahrensituationen nicht erkannt werden. Hochautomatisierte Systeme müssen in der Lage sein, alle Systemgrenzen selbst zu erkennen. Stattdessen kommt der Kontrollübernahme durch den Fahrer eine besondere Rolle zu, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

### **1.3.3 Fahrerübernahme während des hochautomatisierten Fahrens**

Bei der manuellen Übernahme der Fahraufgabe von einem hochautomatisierten System handelt es sich um einen komplexen Prozess. Die Herausforderung besteht für den Fahrer u.a. darin, innerhalb von wenigen Sekunden die Umgebung zu erfassen und eine mentale Repräsentation der Situation aufzubauen, um basierend darauf eine geeignete Handlung auszuwählen. Da bereits geringere Automationsgrade das Situationsbewusstsein des Fahrers beeinträchtigen können (Gugerty, 1997; Stanton & Young, 2005; siehe Kapitel 1.3.2), muss davon ausgegangen werden, dass dies während hochautomatisierter Fahrten ebenso oder verstärkt der Fall ist, da der Fahrer hierbei seine visuelle Aufmerksamkeit vom Verkehrsgeschehen abwenden kann. Neben den kognitiven spielen auch motorische Prozesse eine wichtige Rolle, da der Fahrer während des hochautomatisierten Fahrens im Unterschied zu Fahrten mit ACC eine fahrtaugliche Körperhaltung zu einem bestimmten Grad verlassen kann (z.B. Hände vom Lenkrad nehmen). Für die Untersuchung des Übernahmeverhaltens ist es daher notwendig, nicht nur den letztlichen Fahrereingriff, sondern auch die zugrundeliegenden kognitiven und motorischen Teilprozesse zu berücksichtigen. Auch Untersuchungen zum Ablauf von Bremseneingriffen während des manuellen Fahrens legen eine Unterteilung der Fahrerreaktion in verschiedene Reaktionskomponenten nahe, da diese zum Teil von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden (M. Green, 2000; Ruscio, Ciceri & Biassoni, 2015). Zu Beginn der vorliegenden Arbeit lag in der Literatur noch kein Modell zur Fahrerübernahme vor. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit modellhafte Annahmen zum Ablauf der Fahrerübernahme und den zugrunde liegenden Teilprozessen aufgestellt. Mittlerweile existieren weitere Arbeiten zum Ablauf der Fahrerübernahme; um einen vollständigen Überblick über den Stand der Forschung auf diesem Arbeitsgebiet zu geben, werden diese Vergleichsarbeiten im Folgenden beschrieben.

#### **1.3.3.1 Prozess der Fahrerübernahme**

Petermeijer, de Winter und Bengler (2015) sowie Zeeb, Buchner und Schrauf (2015) unterscheiden vier wesentliche Prozesse, die bei einem visuell abgelenkten Fahrer während der manuellen Übernahme der Fahrzeugführung ablaufen:

- (1) Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit von einer fahrfremden Tätigkeit auf das Verkehrsgeschehen
- (2) Kognitive Verarbeitung der Verkehrssituation und Auswahl einer geeigneten Handlung
- (3) Einnahme einer körperlichen Position, die die Fahrzeugführung erlaubt (Hände ans Lenkrad, Füße an die Pedalerie)
- (4) Ausführung der ausgewählten Handlung mittels Lenkrad/Pedalerie

Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr, Josten und Eckstein (2015) unterscheiden darüber hinaus die Stabilisierung des Fahrzeugs nach einem erfolgten Fahrereingriff, während der eine Übereinstimmung von Ist- und Sollzustand des Fahrzeuges hergestellt wird. Es wird davon ausgegangen, dass kognitive und motorische Prozesse teilweise sequenziell (z.B. Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit und kognitive Verarbeitung der Situation) und teilweise parallel ablaufen (z.B. Hände ans Lenkrad nehmen und kognitive Verarbeitung der Situation; Petermeijer et al., 2015; Zeeb et al., 2015). Der Ablauf der Fahrerübernahme während des hochautomatisierten Fahrens ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

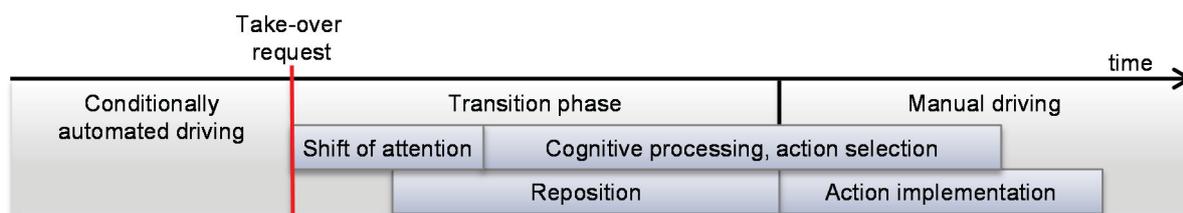


Abbildung 3. Ablauf der manuellen Übernahme der Fahrzeugführung von einem hochautomatisierten System. Adaptiert von Petermeijer et al. (2015); basierend auf Gold und Bengler (2014), Kerschbaum, Lorenz und Hergeth (2015), Zeeb et al. (2015).

Einige dieser Prozesse sind messbar. Die Dauer der Aufmerksamkeitsverlagerung lässt sich für einen visuell abgelenkten Fahrer daran erkennen, wie lange dieser nach Ausgabe der Übernahmeaufforderung für den ersten Blick auf die Straße benötigt. Studien fanden hierfür mittlere Reaktionszeiten von 0.7 bis 1.3 s (Gold, Damböck, Bengler & Lorenz, 2013; Gold, Damböck, Lorenz & Bengler, 2013; Zeeb et al., 2015; Zeeb, Buchner & Schrauf, 2016). Messbar ist ebenfalls der erste Kontakt mit Lenkrad/Pedalerie, der die Dauer bis zur Einnahme einer fahrtauglichen Position wiedergibt. Für den ersten Kontakt mit dem Lenkrad wurden mittlere Reaktionszeiten von 1.1 bis 1.9 s ermittelt (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Gold, Korber, Lechner & Bengler, 2016; Walch, Lange, Baumann & Weber, 2015; Zeeb et al., 2015; Zeeb, Buchner et al., 2016), für den ersten Kontakt mit dem Bremspedal von etwa 1.9 s (Petermann-Stock et al., 2015). Für die letztliche Übernahmezeit gibt es bislang keine einheitliche Definition. Während einige Autoren darunter den Zeitpunkt des ersten Kontaktes mit dem Lenkrad verstehen

(Petermeijer et al., 2015; Walch et al., 2015), wird in der Mehrheit der veröffentlichten Studien Übernahmezeit als die Zeit definiert, die der Fahrer nach Ausgabe einer Übernahmeaufforderung für einen Eingriff in die Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs benötigt, d.h. der Beginn eines Lenk-, Brems- oder auch Beschleunigungsmanövers. Hierfür wurden mittlere Zeiten zwischen 1.6 und 5 s berichtet (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Gold et al., 2016; Körber et al., 2016; Louw, Merat & Jamson, 2015; Petermann-Stock, Hackenberg, Muhr & Mergl, 2013; Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid & Bengler, 2014; Walch et al., 2015; Zeeb et al., 2015; Zeeb, Buchner et al., 2016). Neben diesen Messzeitpunkten für die Übernahmedauer kann auch die Qualität der Fahrerübernahme erfasst werden. Hierfür wurden, je nach Szenario, häufig Parameter herangezogen wie der minimale Abstand zu anderen Fahrzeugen oder Hindernissen, Längs- und Querbeschleunigungen, die Spurabweichung oder die Anzahl an Kollisionen in einer bestimmten Zeitspanne nach der Fahrerübernahme.

Die Varianz der berichteten Reaktionszeiten kann mit den unterschiedlichen experimentellen Bedingungen in den einzelnen Studien erklärt werden, wie z.B. der Gestaltung der Übernahme-situation oder dem Vorhandensein und der Art einer fahrfremden Tätigkeit. So zeigte sich, dass Fahrer bei höherer zeitlicher Dringlichkeit der Situation schneller reagierten, dafür aber eine geringere Qualität der Übernahme aufwiesen (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Walch et al., 2015). Eine gesteigerte Komplexität hingegen, beispielsweise durch eine höhere Verkehrsdichte, führte in Studien zu längeren Übernahmezeiten und einer ebenfalls verschlechterten Übernahmequalität (Gold et al., 2016; Körber et al., 2016; Radlmayr et al., 2014). Auch die Gestaltung der Übernahmeaufforderung spielt eine wichtige Rolle. Multimodale Warnungen scheinen grundsätzlich besser geeignet zu sein als unimodale Warnungen. Es zeigte sich, dass eine visuell-auditive Warnung zu kürzeren Reaktionszeiten und einer verbesserten Übernahmequalität führte als eine rein visuelle Warnung (Naujoks, Mai & Neukum, 2014; Politis, Brewster & Pollick, 2015). Weiter gibt es Befunde, dass die Antizipation einer bevorstehenden Übernahmeaufforderung die Fahrzeugführung sowie das Blickverhaltensmuster des Fahrers nach der Übernahme positiv beeinflusst (Merat, Jamson, Lai, Daly & Carsten, 2014). Dies deckt sich mit Befunden zum nicht-automatisierten Fahren, dass Bremsreaktionen durch die Erwartung eines Ereignisses deutlich verkürzt werden (M. Green, 2000; Ruscio et al., 2015). Ruscio und Kollegen fanden jedoch auch, dass nicht alle Verarbeitungsstufen gleichermaßen davon beeinflusst werden: Die Erwartung einer Warnung verkürzte zwar die Wahrnehmung und kognitive Verarbeitung der Situation, nicht jedoch die Zeit, die für die motorische Ausführung der Bremsreaktion benötigt wurde.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Übernahmefähigkeit der Fahrer ist die zusätzliche Beanspruchung durch die Ausführung einer fahrfremden Tätigkeit. In den letzten Jahren wurden hierzu bereits erste Untersuchungen angestellt, wobei die Ergebnisse bislang keine einheitliche Interpretation erlauben. Auch an dieser Stelle sollte berücksichtigt werden, dass viele dieser Befunde erst im Laufe der vorliegenden Arbeit entstanden sind.

### **1.3.3.2 Fahrfremde Tätigkeiten während des hochautomatisierten Fahrens**

Während des hochautomatisierten Fahrens muss verstärkt von einem abgelenkten Fahrer ausgegangen werden. Mit der fortschreitenden Abgabe der Fahrzeugkontrolle kommt bei Fahrern verstärkt der Wunsch auf, die Fahrtzeit effizienter zu nutzen. In Umfragen geben auch heute schon etwa 30% der Befragten an, dass sie sich während einer automatisierten Fahrt anderen Aktivitäten zuwenden würden (Schoettle & Sivak, 2014). Häufig genannte Tätigkeiten sind dabei Lesen, sich mit Beifahrern beschäftigen, Emails/SMS schreiben, Telefonieren, Ausruhen/Schlafen oder Filme/TV schauen (Kyriakidis, Happee & de Winter, 2015; Schoettle & Sivak, 2014). Ein Teil der Befragten würde sich nach eigener Aussage dagegen nicht mit derartigen Tätigkeiten beschäftigen, sondern die Fahrumgebung beobachten (Kyriakidis et al., 2015; Schoettle & Sivak, 2014). Dies ist vermutlich mitunter durch eine derzeit bestehende Skepsis hinsichtlich der Zuverlässigkeit automatisierter Systeme bedingt. 80% der Befragten gaben in einer Umfrage in den USA, Großbritannien und Australien an, starke oder mäßige Bedenken hinsichtlich Sicherheitsrisiken durch System- oder Komponentenausfälle hochautomatisierter Fahrzeuge zu haben (Schoettle & Sivak, 2014). Es ist wahrscheinlich, dass der Wunsch nach fahrfremden Tätigkeiten mit steigendem Systemvertrauen und Erfahrung im Umgang mit Automation weiter zunimmt.

Auch empirische Studien weisen darauf hin, dass die Zuwendung zu fahrfremden Tätigkeiten mit steigendem Automationsgrad zunimmt (Jamson et al., 2013). In einer Fahrsimulatorstudie von Carsten, Lai, Barnard, Jamson und Merat (2012) konnten Fahrer selbst entscheiden ob und wann sie sich mit fahrfremden Tätigkeiten beschäftigten. Die Fahrer wendeten sich während nicht-automatisierter Fahrten durchschnittlich etwa 2.5% der Fahrtzeit einer DVD zu, bei automatisierter Querführung zu 18% und bei automatisierter Quer- und Längsführung zu 33% der Fahrtzeit. Eine Metastudie von de Winter et al. (2014) kommt zu ähnlichen Ergebnissen: Gegenüber manuellen Fahrten lag in Studien die Zahl der bearbeiteten fahrfremden Tätigkeiten während der Nutzung von ACC durchschnittlich um 12% höher, während hochautomatisierter Fahrten sogar 2.5 mal so hoch.

Einige Autoren berichten, dass die Ausführung einer fahrfremden Tätigkeit die Übernahme der Fahrzeugführung während einer hochautomatisierten Fahrt beeinträchtigt. In einer Studie von Feldhütter, Gold, Schneider und Bengler (2016) benötigten Fahrer, die die visuell ablenkende Surrogate Reference Task (ISO/TS, 2012) ausführten, mehr Zeit für einen Fahrereingriff als Fahrer ohne fahrfremde Tätigkeit. Eine beeinträchtigte Übernahmeleistung wurde auch für kognitive Ablenkung gefunden: Fahrer, die während einer hochautomatisierten Fahrt eine Art Quiz spielten, reagierten zwar nicht später als Fahrer ohne zusätzliche Tätigkeit, wiesen nach der Übernahme jedoch einen geringeren zeitlichen Abstand zu einem Hindernis auf der eigenen Spur und damit eine gesteigerte Kritikalität der Situation auf (Körper et al., 2016). Petermann-Stock et al. (2013) variierten gezielt das Beanspruchungslevel der fahrfremden Tätigkeit (auditive vs. auditive und visuelle vs. auditive, visuelle und manuelle Ablenkung) und fanden, dass die Fahrer mit steigender Beanspruchung mehr Zeit bis zu einem Fahrereingriff benötigen.

Im Gegensatz hierzu finden andere Autoren keine Unterschied zwischen abgelenkten und nicht-abgelenkten Fahrern (Gold et al., 2016; Louw et al., 2015; Neubauer, Matthews & Saxby, 2014) oder sogar positive Effekte durch fahrfremde Tätigkeiten. Neubauer et al. (2012) fanden, dass die Nutzung eines Mobiltelefons die Reaktionszeiten auf ein plötzlich einscherendes Vorderfahrzeug während manuellen Fahrens zwar verlängerte, während des automatisierten Fahrens jedoch verkürzte. Die Autoren erklären dies mit einer gesteigerten Wachsamkeit durch die zusätzliche Beschäftigung des Fahrers, konnten diesen Befund in einer späteren Studie jedoch nicht replizieren (Neubauer et al., 2014). Hinweise auf einen wachsamkeitsfördernden Einfluss durch fahrfremde Tätigkeiten liefert auch eine Studie von Schömig, Hargutt, Neukum, Petermann-Stock und Othersen (2015), die während einer hochautomatisierten Fahrt den Augenöffnungsgrad als Maß für Müdigkeit erfassten. Diese Autoren fanden ein reduziertes Müdigkeitslevel von Fahrern mit zusätzlicher Quiz-Aufgabe und schlossen, dass motivierende Tätigkeiten dem Entstehen von Müdigkeit infolge der ansonsten eher monotonen automatisierten Fahrt entgegenwirken können. Tatsächlich wurde während des automatisierten Fahrens ohne zusätzliche Tätigkeit eine zunehmende Ermüdung des Fahrers sowie eine Abnahme dessen Vigilanz festgestellt (Körper, Cingel, Zimmermann & Bengler, 2015). Verschiedene Autoren gehen daher davon aus, dass kognitive Unterforderung durch Automation ebenso gefährlich sein kann wie ein zu hoher Workload, da dies zu einer vernachlässigten Überwachung der Umgebung und einem reduzierten Situationsbewusstsein führen kann (Hancock & Parasuraman, 1992; Young & Stanton, 2002a, 2002b). Diese Annahmen sind in Übereinstimmung mit Studien zum manuellen Fahren, in denen die Ausführung kognitiv beanspruchender fahrfremder Tätigkeiten während einer monotonen Fahrt die Fahrleistung steigerten und das subjektive Müdigkeitslevel der

Fahrer reduzierten (Gershon, Ronen, Oron-Gilad & Shinar, 2009; Oron-Gilad et al., 2008). Eine Studie von Takayama und Nass (2008) deutet zudem darauf hin, dass dies vor allem für interaktive Tätigkeiten und weniger für passive Tätigkeiten gilt. Die Fahrer beschäftigten sich in dieser Studie während manuellen Fahrten mit einem auditiven Sprachlernprogramm, welches entweder passiv (reines Zuhören) oder interaktiv (verbales Wiederholen der Inhalte) gestaltet war. Es zeigte sich, dass die interaktive Tätigkeit die Fahrleistung müder Fahrer steigerte, während dies für die passive Tätigkeit nicht der Fall war.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Fahrer ihre Fahrtzeit während des hochautomatisierten Fahrens zunehmend sinnvoll und angenehm nutzen möchten. Wie sich fahrfremde Tätigkeiten dabei auf die Fahrerübernahme auswirken, geht aus bisherigen Studien nicht eindeutig hervor. Darüber hinaus wurde einigen Aspekten bislang wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Im folgenden Kapitel werden Forschungslücken im Zusammenhang mit der Übernahme der Fahraufgabe während des hochautomatisierten Fahrens durch einen abgelenkten Fahrer identifiziert, zu deren Untersuchung die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten soll.

#### **1.4 Weiterer Forschungsbedarf**

Beim nicht-automatisierten Fahren kann der Fahrerzustand anhand fahrleistungsbezogener Variablen, wie z.B. der Spurhaltungsgüte, abgeleitet werden (z.B. Engström et al., 2005; Green, 1999). Dies findet Anwendung in Assistenzsystemen wie Unaufmerksamkeits- oder Müdigkeitswarnern (z.B. Mercedes-Benz Attention Assist; Langer, Abendroth & Bruder, 2015). Während des hochautomatisierten Fahrens ist die Kenntnis von Zustand und Übernahmereitschaft des Fahrers von mindestens ebenso großer Bedeutung, da gewährleistet werden muss, dass auch ein abgelenkter Fahrer die Fahrzeugführung jederzeit wieder übernehmen kann (Cacilo et al., 2015; Gasser et al., 2015). Hierdurch könnte ein nicht übernahmebereiter Fahrer früher gewarnt oder systemseitig risikominimierende Manöver eingeleitet werden. Fahrleistungsbezogene Parameter können bei automatisierter Fahrzeugführung jedoch nicht angewendet werden. Studien zum manuellen Fahren zeigen zwar, dass auch das Blickverhalten der Fahrer ein guter Indikator für visuelle Ablenkung darstellt (Green, 1999; Peng et al., 2013; Victor et al., 2005). Dieses wurde während des automatisierten Fahrens bislang jedoch kaum untersucht und es ist nicht bekannt, inwiefern ein Zusammenhang zur Übernahmeleistung besteht. Eine Untersuchung dessen wäre ein wichtiger erster Schritt zur Abschätzung von Möglichkeiten der Fahrerzustandserkennung während des automatisierten Fahrens.

Weiter ist ein umfassendes Verständnis wesentlich, wie sich die zusätzliche Beanspruchung des Fahrers durch fahrfremde Tätigkeiten auf die Übernahmezeit und -qualität auswirkt. Dies ist

einerseits für die Festlegung des systemseitig vorgegebenen Zeitfensters notwendig, das eine sichere und komfortable Kontrollübernahme durch den Fahrer erlauben muss. Andererseits ist die Untersuchung fahrfremder Tätigkeiten relevant für die Abschätzung, ob und welche Tätigkeiten während hochautomatisierter Fahrten zukünftig erlaubt werden könnten, ohne eine sichere Fahrerübernahme zu gefährden. Während bereits eine Vielzahl von Forschungsergebnissen zu Fahrerablenkung während des nicht-automatisierten Fahrens vorliegt (siehe Kapitel 1.2), ist unklar, inwiefern diese Erkenntnisse auf automatisiertes Fahren übertragen werden können. Weiter liefern bisherige Untersuchungen zu fahrfremden Tätigkeiten während des hochautomatisierter Fahrens keine eindeutigen Ergebnisse und erfordern weitere Forschung: Während einige Studien eine beeinträchtigte Übernahmeleistung des Fahrers finden (Feldhütter et al., 2016; Körber et al., 2016; Petermann-Stock et al., 2013), berichten andere positive Effekte durch eine gesteigerte Wachsamkeit des Fahrers (Neubauer et al., 2012; Schömig et al., 2015). In weiteren Studien zeigte sich darüber hinaus kein Unterschied zwischen abgelenkten und nicht-abgelenkten Fahrern (Gold et al., 2016; Louw et al., 2015; Neubauer et al., 2014). Hier ist weitere Forschung nötig, wobei einigen, bislang nicht ausreichend untersuchten Aspekten, besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Der Großteil der genannten Studien (siehe Kapitel 1.3.3.2) setzte standardisierte, artifizielle Aufgaben als fahrfremde Tätigkeit ein. Zur visuellen Beanspruchung führten Fahrer in mehreren Studien beispielsweise die SuRT aus (z.B. Feldhütter et al., 2016; Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Gold, Lorenz & Bengler, 2014; Radlmayr et al., 2014). Kognitive Ablenkung wurde u.a. durch quizartige Spiele (z.B. Gold et al., 2016; Körber et al., 2016; Merat, Jamson, Lai & Carsten, 2012; Petermann-Stock et al., 2013; Schömig et al., 2015) oder durch die „N-Back“-Aufgabe induziert (Radlmayr et al., 2014). Demgegenüber setzte nur eine vergleichsweise geringe Zahl von Studien naturalistische fahrfremde Tätigkeiten ein (z.B. Lesen auf einem Tablet: Louw et al., 2015; Bedienen eines Mobiltelefons: Neubauer et al., 2012). Während standardisierte Aufgaben gute experimentelle Kontrolle erlauben, weisen diese jedoch nicht immer auch eine hohe ökologische Validität auf, da sie nicht zwangsläufig dieselben Effekte auf die Fahrleistung ausüben wie natürliche Tätigkeiten (Shinar, Tractinsky & Compton, 2005; Young & Regan, 2007). So verglichen Shinar et al. (2005) zwei Aufgaben zur Mobiltelefonnutzung: das Führen eines emotionalen Gespräches und das Lösen von mathematischen Aufgaben. Letzteres wird häufig zur Simulation von Telefongesprächen eingesetzt. Die Autoren fanden, dass sich die mathematischen Aufgaben deutlich stärker auf die Fahrleistung auswirkten als das natürliche Gespräch. Um den Einfluss von Fahrerablenkung auf die Nutzung hochautomatisierter Systeme valide abzusichern, müssen daher neben standardisierten Aufgaben

auch naturalistische Tätigkeiten untersucht werden, die das Beanspruchungspotenzial widerspiegeln, das Fahrer bei Beschäftigung mit derartigen Tätigkeiten während des zukünftigen automatisierten Fahrens tatsächlich erleben könnten. Weiter konzentrierten sich die bislang durchgeführten Studien größtenteils auf visuell-kognitive Ablenkung (siehe Kapitel 1.3.3.2). Bereits heute nimmt jedoch die Beschäftigung mit Smartphones oder anderer elektronischer Geräte während des Fahrens zu und Befragungen zeigen, dass sich Fahrer während des automatisierten Fahrens verstärkt derartigen Tätigkeiten zuwenden würden (Kyriakidis et al., 2015). Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, neben visuell-kognitiver Ablenkung auch den Einfluss manueller Beanspruchung auf die Übernahmeleistung der Fahrer zu untersuchen. Zwar sind einige der eingesetzten Tätigkeiten in bestimmtem Maße auch manuell beanspruchend (z.B. das Tippen auf einem fest montierten Display), jedoch wurde motorische Beanspruchung bislang kaum systematisch variiert und untersucht.

### ***1.5 Ziele der vorliegenden Arbeit***

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der manuellen Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrer während des hochautomatisierten Fahrens. Besonderer Fokus wird dabei auf den Einfluss durch fahrfremde Tätigkeiten gelegt. Um eine möglichst hohe ökologische Validität zu erzielen, werden hierfür naturalistische Tätigkeiten eingesetzt, wie zum Beispiel das Lesen eines Nachrichtentextes oder das Schreiben einer Email. Dabei wird zunächst grundsätzlich überprüft, ob sich basierend auf dem Blickverhalten der Fahrer Variablen finden lassen, die die Ablenkung und Übernahmebereitschaft des Fahrers während der automatisierten Fahrt widerspiegeln. Darüber hinaus soll die Stärke visuell-kognitiver sowie manueller Beanspruchung systematisch variiert werden, um die Auswirkungen unterschiedlich stark beanspruchender fahrfremder Tätigkeiten auf die Übernahmezeit und -qualität der Fahrer zu analysieren.

Der in der vorliegenden Arbeit untersuchte Anwendungsfall besteht dabei in einer vom System erkannten Systemgrenze, woraufhin eine Übernahmeaufforderung ausgegeben wird. Szenarien wie Systemfehler oder -ausfälle, die zur Absicherung hochautomatisierter Systeme ebenfalls untersucht werden müssen, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Der Grund hierfür ist, dass es für die Entwicklung dieser Systeme sinnvoll ist, vor der Beschäftigung mit Ausnahmesituationen zunächst ein umfassendes Verständnis des Regelfalles zu erlangen. Weiterhin beziehen sich diese Untersuchungen auf Autobahnfahrten, da die ersten hochautomatisierten Systeme voraussichtlich auf Autobahnen zum Einsatz kommen werden. Aus diesen Anforderungen lassen sich konkrete Fragestellungen ableiten, die in drei Fahrsimulatorstudien adressiert werden:

- (1) Welche der Fahrerübernahme zugrundeliegenden kognitiven und motorischen Prozesse lassen sich identifizieren und modellhaft darstellen?
- (2) Wie lässt sich visuelle Fahrerablenkung während des hochautomatisierten Fahrens erkennen? Gibt es ähnlich dem nicht-automatisierten Fahren einen Zusammenhang zwischen den durch die fahrfremden Tätigkeiten bedingten Blickabwendungen vom Verkehrsgeschehen und dem Übernahmeverhalten des Fahrers?
- (3) Wie wirken sich visuell-kognitive sowie manuelle Beanspruchung durch fahrfremde Tätigkeiten auf die Übernahmefähigkeit der Fahrer und die unter (1) aufgestellten Teilprozesse aus? Welchen Einfluss haben unterschiedliche Übernahmeszenarien?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen werden drei aufeinander aufbauende Studien im Fahrsimulator durchgeführt. Im Rahmen von Studie 1 sollen grundlegende Annahmen zur Fahrerübernahme aufgestellt und untersucht werden. Anhand eines einfachen Modells zum Ablauf der Fahrerübernahme sollen zentrale Annahmen zu den darin enthaltenen Subprozessen abgeleitet und überprüft werden. Gleichzeitig soll untersucht werden, inwiefern das Blickverhalten visuell abgelenkter Fahrer während des automatisierten Fahrens im Zusammenhang mit deren Übernahmeverhalten steht. In Studien 2 und 3 werden die hierin abgeleiteten Annahmen aufgegriffen und die Beanspruchung durch fahrfremde Tätigkeiten gezielt variiert um deren Einfluss auf die Fahrerübernahme zu untersuchen. Studie 2 dient dabei teilweise methodischen Fragestellungen. Hierin sollen zunächst geeignete Übernahmeszenarien sowie Arten von Tätigkeiten gefunden werden, anhand derer sich die Auswirkungen von Fahrerablenkung untersuchen lassen. Studie 3 baut auf diesen Ergebnissen auf; hierin sollen die visuell-kognitive sowie manuelle Beanspruchung des Fahrers durch fahrfremde Tätigkeiten gezielt variiert werden. Auf diese Studien wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

## 2 Studien

Die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen von drei Versuchen im konzerninternen Fahrsimulator der Daimler AG untersucht. Abgesehen von der Datenerhebung zu Studie 1, die im Rahmen eines übergeordneten, internen Versuchs stattfand, übernahm die Autorin jeweils hauptverantwortlich Planung, Vorbereitung, Auswertung und Dokumentation der Studien. Da die Datenerhebung im Mercedes-Benz-Fahrsimulator standardmäßig im Zweischichtbetrieb mit je zwei Versuchsleitern pro Schicht stattfindet, können pro Versuchsleiter maximal 25% der Daten erhoben werden. Der prozentuale Anteil des Autors an den einzelnen Studien kann dabei wie folgt beziffert werden:

Studie 1	Einleitung (90%); Methodik (40%); Datenerhebung (0%); Auswertung (80%); Diskussion (90%)
Studie 2	Einleitung (90%); Methodik (70%); Datenerhebung (25%); Auswertung (85%); Diskussion (90%)
Studie 3	Einleitung (90%); Methodik (85%); Datenerhebung (25%); Auswertung (80%); Diskussion (90%)

Tabelle 2 beinhaltet eine Übersicht der zu den einzelnen Studien veröffentlichten bzw. zur Veröffentlichung eingereichten Beiträge. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Studien zusammengefasst und als Überblick dargestellt. Eine ausführliche Dokumentation der durchgeführten Versuche findet sich in den veröffentlichten bzw. zur Veröffentlichung eingereichten Zeitschriftenartikeln (s. Einzelarbeiten).

*Tabelle 2.* Übersicht der zu den einzelnen Studien veröffentlichten bzw. zur Veröffentlichung eingereichten Beiträge.

Studie	Autoren	Jahr	Titel	Beitragsart	Zeitschrift bzw. Konferenz	Status
1	Zeeb, K., Schrauf, M.	2014	Situationsgerechtes Blickverhalten beim hochautomatisierten Fahren.	Artikel (Konferenzband)	Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig	Veröffentlicht
1	Zeeb, K., Buchner, A., Schrauf, M.	2015	What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving.	Artikel (Zeitschrift)	Accident Analysis & Prevention	Veröffentlicht
2	Zeeb, K., Schrauf, M.	2015	Underload, alertness or distraction: Examining the impact of secondary tasks while conditionally automated driving.	Vortrag (Konferenz)	International Conference on Driver Distraction and Inattention, Sydney	Veröffentlicht
2	Zeeb, K., Buchner, A., Schrauf, M.	2016	Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving.	Artikel (Zeitschrift)	Accident Analysis & Prevention	Veröffentlicht
3	Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A., Schrauf, M.	2016	Why is braking not the same as steering? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver interventions during conditionally automated driving.	Artikel (Zeitschrift)	Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour	Eingereicht

## 2.1 Studie 1

In Studie 1 sollte ein Modell der Fahrerübernahme aufgestellt und ein möglicher Zusammenhang zwischen Blick- und Übernahmeverhalten untersucht werden. Hierfür wurden zunächst der Fahrerübernahme zugrundeliegende kognitive und motorische Prozesse identifiziert und grundsätzliche Annahmen zu deren Ablauf abgeleitet. Zentrale Prozesse für einen visuell abgelenkten Fahrer umfassen dabei die Einnahme einer Sitzposition, die die Fahrzeugführung erlaubt (Blick auf die Straße, Hände ans Lenkrad, Füße an die Pedalerie), die kognitive Verarbeitung der Situation sowie die Auswahl einer geeigneten Handlung und Ausführung dieser Aktion. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit auf die Straße und die kognitive Verarbeitung der Situation sequenziell ablaufen, da die Verkehrssituation ohne visuelle Information kaum adäquat verarbeitet werden kann. Dasselbe gilt für die Einnahme einer geeigneten Position und die Ausführung des Fahrereingriffs; bevor der Fahrer die Hände ans Lenkrad genommen hat, kann er keinen Lenkeingriff vornehmen. Die überwiegend motorischen Teilprozesse können hingegen durchaus parallel zur Aufmerksamkeitsverlagerung und kognitiven Verarbeitung ablaufen.

Während des manuellen Fahrens besteht ein enger Zusammenhang von visueller Ablenkung und der Fahrleistung der Fahrer (Horrey & Wickens, 2007; Klauer et al., 2006). In einem zweiten Schritt sollte daher überprüft werden, ob sich analog dazu während des hochautomatisierten Fahrens ein Einfluss des Blickverhaltens eines visuell abgelenkten Fahrers auf die identifizierten Teilprozesse der Fahrerübernahme finden lässt. Dies würde auch während des automatisierten Fahrens eine Erkennung des Fahrerzustandes ermöglichen und ist daher von großem Interesse. Um dies zu untersuchen, wurden Daten von 89 Teilnehmern eines Fahrsimulatorversuchs ausgewertet. Die Probanden fuhren hochautomatisiert auf der Autobahn und bearbeiteten währenddessen Aufgaben im Zentraldisplay mithilfe eines Dreh-Drück-Stellers. In drei Situationen wurde eine Übernahmeaufforderung ausgegeben und die Fahrer mussten die Fahrzeugführung übernehmen. Bei der dritten Übernahmesituation handelte es sich dabei um eine Notfallsituation von hoher Kritikalität und Zeitdringlichkeit. Das Blickverhalten der Fahrer in der letzten Minute vor dieser Situation sowie verschiedene Reaktionszeiten während der Übernahme (erster Blick auf die Straße, erster Kontakt mit dem Lenkrad, Bremsengriff) wurden erfasst und ausgewertet.

Es wurden Blickparameter gefunden, die sich als geeignet erwiesen, die Aufmerksamkeitsverteilung zwischen Fahraufgabe und fahrfremder Tätigkeit zu charakterisieren und die Fahrer hiernach in „Low“, „Medium“ und „High-risk Drivers“ zu kategorisieren. „Low-risk Drivers“ zeigten zwar viele Blickzuwendungen zur fahrfremden Tätigkeit, dafür waren diese jedoch von einer geringen maximalen Blickdauer. „High-risk Drivers“ zeigten das entgegengesetzte Muster: Diese wiesen wenige Blicke auf die fahrfremde Tätigkeit auf, allerdings mit einer langen maximalen Blickdauer. Die so gebildeten Fahrergruppen unterschieden sich in ihrem Übernahmeverhalten: „High-risk Drivers“ benötigten mehr Zeit für einen Bremsengriff und verursachten mehr Kollisionen als die übrigen Fahrergruppen. Es konnte jedoch kein Unterschied in der Zeit bis zum ersten Blick auf die Straße und bis zum ersten Kontakt mit dem Lenkrad zwischen den Fahrergruppen gefunden werden. Basierend darauf wurde angenommen, dass visuelle Ablenkung nur geringe Auswirkungen auf die motorische Reaktionsgeschwindigkeit hat. Die Annahme, dass die Ausführung motorischer Prozesse zu gewissen Teilen unabhängig vom kognitiven Zustand des Fahrers ist, wird durch weitere Studien unterstützt. Ruscio et al. (2015) untersuchten Bremsreaktionen während des manuellen Fahrens und fanden, dass die Erwartung einer Warnung die Wahrnehmung und kognitive Verarbeitung der Situation verkürzte, nicht jedoch die Zeit, die für die motorische Ausführung der Bremsreaktion benötigt wurde. Weiter berichten Gold et al. (2016) basierend auf einer Studie zum hochautomatisierten Fahren einen Einfluss der Komplexität der Übernahmesituation auf die Zeit bis zu einem Fahrereingriff,

kaum jedoch auf den ersten Lenkradkontakt. Daher wurde angenommen, dass sich visuell-kognitive Ablenkung während der Fahrerübernahme vor allem auf die visuelle und kognitive Verarbeitung der Übernahme-situation auswirkt. Dies könnte durch das Situationsbewusstsein des Fahrers zu erklären sein: Eine gut angepasste Aufmerksamkeitsaufteilung zwischen Fahraufgabe und fahrfremder Tätigkeit, wie sie von „Low-risk Drivers“ gezeigt wurde, könnte den Aufbau einer adäquaten mentalen Repräsentation der Fahrumgebung begünstigen und dadurch in einer Übernahme-situation die kognitive Verarbeitung erleichtern und einen schnellen und adäquaten Fahrereingriff erlauben. Unterstützt wird diese Annahme durch Studien, die Hinweise liefern, dass ein schlecht angepasstes Blickverhalten während des manuellen Fahrens zu einem inadäquaten Situationsmodell führt (Crundall & Underwood, 2011; Underwood, 2007). Dies impliziert, dass das Blickverhalten des Fahrers während des automatisierten Fahrens nicht nur ein Indikator für dessen Ablenkung, sondern ebenfalls ein Prädiktor für dessen Übernahmefähigkeit ist.

## **2.2 Studie 2**

In Studie 2 sollten die in Studie 1 abgeleiteten Annahmen zum Einfluss von Fahrerablenkung auf den Übernahmeprozess mit veränderten Versuchsbedingungen repliziert und validiert werden. In Studie 1 wurde eine Notfallsituation untersucht, die für die Fahrer bewusst schwer zu handhaben war. In Studie 2 wurden dagegen Übernahme-situationen von eher geringer Kritikalität untersucht. Die eigentliche Prüfsituation bestand aus einem Verlust der Spurmarkierungen in einer Kurve bei Seitenwind, sodass ein Lenkeingriff zur Stabilisierung der Querführung notwendig war. Um zusätzlich Lerneffekte zu untersuchen, erlebten die Fahrer darüber hinaus drei weitere Übernahme-situationen. Diese dienten auch dazu, geeignete Übernahme-szenarien zu finden, die in Studie 3 aufgegriffen werden sollten. Weiter wurden in Studie 1 fahrfremde Tätigkeiten eingesetzt, die den Status quo des Infotainmentangebotes in aktuellen Mercedes-Benz Fahrzeugmodellen darstellen (einfache Texteingaben mithilfe des Dreh-Drück-Stellers, der z.B. in aktuellen E- und S-Klasse-Modellen (W213, W222) verbaut ist). Dies spiegelt jedoch vermutlich weder inhaltlich noch hinsichtlich der Eingabemodalität wider, womit sich Fahrer zukünftig während automatisierter Fahrten beschäftigen werden. Ziel von Studie 2 war es daher, den Einfluss verschiedener naturalistischer fahrfremder Tätigkeiten (Emails schreiben, Nachrichtentext lesen und Video schauen) auf die Fahrerübernahme in zeitlich unkritischen Situationen zu untersuchen. Anhand dieser Ergebnisse sollten dann geeignete experimentelle Bedingungen und Parameter für eine weitergehende Untersuchung von Fahrerablenkung in Studie 3 abgeleitet werden. Basierend auf Studie 1 wurde erwartet, dass Fahrerablenkung einen Einfluss

auf die Zeit bis zu einem Fahrereingriff ausübt, nicht jedoch auf die vermutlich vorwiegend motorisch bedingten Zeiten bis zum ersten Blick auf die Straße und zum ersten Kontakt mit dem Lenkrad.

Während Fahrer mit zusätzlicher Tätigkeit tatsächlich ähnlich viel Zeit für den ersten Lenkradkontakt benötigten wie eine Kontrollgruppe ohne fahrfremde Tätigkeit, konnten entgegen der Erwartungen ebenfalls nur geringe Unterschiede in der Zeit, bis die Fahrer die Fahrzeugführung übernahmen, gefunden werden. Es zeigte sich jedoch ein Einfluss der Fahrerablenkung auf die Qualität der Übernahme: Fahrer, die einen Nachrichtentext lasen oder ein Video schauten, wiesen, nachdem sie die Fahrzeugführung übernommen hatten, eine größere Spurabweichung und Querbeschleunigung auf als nicht abgelenkte Fahrer. Es wird vermutet, dass der ausbleibende Einfluss visueller Ablenkung auf die Zeit bis zur Übernahme der Fahrer mit der geringen Zeitdringlichkeit der Situation zu erklären ist. Auch in weiteren Studien wurde gefunden, dass Fahrer umso später reagieren, je mehr Zeit sie zur Verfügung haben (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Walch et al., 2015). Da in Studie 2 im Gegensatz zu Studie 1 kein unmittelbarer Fahrereingriff zur Kollisionsvermeidung nötig war, könnten mögliche Ablenkungseffekte durch das eher großzügige Zeitfenster verdeckt worden sein. Die gefundenen Unterschiede in der Übernahmequalität zeigen jedoch, dass ein Einfluss durch Fahrerablenkung dennoch vorhanden ist und unterstreichen die Notwendigkeit, nicht nur die Schnelligkeit, sondern auch die Qualität einer Fahrerübernahme zu berücksichtigen. Weiter impliziert dies, dass die Übernahmequalität nicht nur von der motorischen Reaktionsgeschwindigkeit der Fahrer abhängt, sondern auch von deren kognitivem Zustand.

Darüber hinaus zeigten sich auch fahrerbezogene Einflussfaktoren auf die Fahrerübernahme. Sowohl die Zeit bis zum ersten Straßenblick als auch bis zum ersten Lenkradkontakt wurde im Laufe der vier Übernahmesituationen kürzer, was einen Lerneffekt widerspiegelt. Dieser wurde durch die Vorerfahrung mit ACC moderiert. Während Novizen, die noch nie zuvor ACC genutzt hatten, in der vierten Übernahmesituation deutlich schneller reagierten als in der ersten, ließ sich für regelmäßige ACC-Nutzer kein Unterschied zwischen beiden Situationen feststellen. Dies legt nahe, dass vor allem Fahrer, die wenig Vorerfahrung mit Fahrerassistenzsystemen haben, Zeit für die Gewöhnung an hochautomatisierte Systeme benötigen. Die Tatsache, dass nach einer weniger als 30-minütigen automatisierten Fahrt (d.h. in der letzten Übernahmesituation) keine Unterschiede zu regelmäßigen Nutzern mehr vorlagen, zeigt allerdings auch, dass dies recht schnell geschehen kann.

Die hier gefundenen Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund methodischer Einschränkungen interpretiert werden. Kleine Stichprobengrößen, v.a. der Kontrollgruppe, aber auch die nicht ausbalancierte Reihenfolge der Übernahmeszenarien schränken die Verallgemeinerbarkeit der Befunde ein. Dennoch lassen sich basierend hierauf Erkenntnisse ableiten, die in Studie 3 aufgegriffen wurden.

### **2.3 Studie 3**

Während in Studie 2 verschiedene fahrfremde Tätigkeiten untersucht wurden, sollte in Studie 3 eine dieser Tätigkeiten ausgewählt und eingesetzt werden, um Modalität und Intensität der Beanspruchung systematisch zu variieren. Aufgrund der gefundenen Effekte sowie methodischer Vorteile in der Anwendbarkeit, bestand die Aufgabe in Studie 3 im Lesen eines Nachrichtentextes, der auf einem Tablet dargeboten wurde. Dabei wurde sowohl die kognitive (Lesen vs. Korrekturlesen) als auch die manuelle Beanspruchung variiert (Tablet wird in den Händen gehalten vs. Tablet befindet sich in einer Halterung). Die untersuchten Übernahmesituationen bestanden aus dem Lenkszenario aus Studie 2 sowie einem zusätzlichen Bremsszenario, sodass die Fahrer sowohl einen Quer- als auch einen Längseingriff vornehmen mussten. Da in Studie 2 vermutet wurde, dass eine zu geringe Kritikalität der Übernahmeszenarien Ablenkungseffekte verdeckt haben könnte, wurden beide Situationen in Studie 3 deutlich zeitdringlicher gestaltet. Hinsichtlich des Lenkszenarios wurden entsprechende Modifikationen vorgenommen: Während sich die Fahrerübernahme in beiden Studien auf einer Linkskurve ereignete, kam in Studie 3 der Seitenwind zusätzlich von links anstatt von rechts, damit beides ein Abdriften in dieselbe Richtung bewirkte. Zusätzlich wurde in Studie 3 die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs um 10 km/h erhöht und das Zeitfenster bis zum Abschalten des hochautomatisierten Systems auf 3.5 s verkürzt. Dass dies die Handhabung der Situation tatsächlich erschwerte, lässt sich daran erkennen, dass die Kontrollgruppe ohne fahrfremde Tätigkeit in Studie 3 während des Seitenwindes eine fast doppelt so große mittlere Abweichung von der Spurmitte aufwies wie die Kontrollgruppe in Studie 2 (0.38 vs. 0.20 m).

Ziel der Studie war es, den Einfluss kognitiver und manueller Beanspruchung fahrfremder Tätigkeiten auf die Übernahmefähigkeit der Fahrer bei Quer- und Längseingriffen auf der Autobahn zu untersuchen. Basierend auf den Studien 1 und 2 wurde dabei erwartet, dass starke kognitive Beanspruchung die Zeit bis zu einem Fahrereingriff verzögert und die Übernahmequalität verschlechtert, die Zeit bis zum ersten Blick auf die Straße sowie dem ersten Kontakt mit dem Lenkrad jedoch kaum beeinflusst. Fahrer mit hoher manueller Beanspruchung sollten hingegen ebenfalls mehr Zeit für den ersten Kontakt mit dem Lenkrad benötigen, was sich auch auf die

Zeit bis zu einem Fahrereingriff sowie die Übernahmequalität auswirken sollte. Es wurde darüber hinaus erwartet, dass sich manuelle Beanspruchung stärker auf einen Lenk- als auf einen Bremseneingriff auswirkt.

Die Ergebnisse zeigten, dass Fahrer, die das Tablet in den Händen hielten, tatsächlich mehr Zeit für den ersten Blick auf die Straße, den ersten Kontakt mit dem Lenkrad und einen Eingriff in die Fahrzeugführung benötigten. Weiter wiesen diese Fahrer eine schlechtere Übernahmequalität auf. Wie erwartet waren diese Effekte während eines Lenkeingriffes stärker ausgeprägt als während eines Bremseneingriffes. Der Grund dafür, dass manuell beanspruchte Fahrer entgegen der Erwartungen auch länger für den ersten Blick auf die Straße benötigten, liegt vor allem darin, dass ein Teil der Fahrer in der Übernahmesituation ungünstig mit dem Tablet umging. Diese Fahrer legten das Tablet nach Erhalt der Warnung zunächst ab und übernahmen dann die Fahrzeugführung, wodurch sie den Blick länger auf das Tablet gerichtet hielten. Es lässt sich nicht klar sagen, ob dies der Fall war, weil die Fahrer das Tablet sicher ablegen wollten oder weil sie inhaltlich in die Tätigkeit vertieft waren. Da Fahrer mit einer inhaltlich leichten und schweren Aufgabe dieses Verhalten gleich häufig zeigten, wird vermutet, dass der Grund im sicheren Ablegen des Tablets lag.

Die Auswirkungen kognitiver Beanspruchung erwiesen sich demgegenüber als weniger einheitlich und abhängig von der Art des Fahrereingriffes. Bei der Ausführung eines Lenkmanövers wiesen Fahrer mit kognitiv stark beanspruchender fahrfremder Tätigkeit wie erwartet einen verzögerten Fahrereingriff und Verschlechterungen in der Qualität der Übernahme auf. Entgegen der Erwartungen benötigten diese Fahrer jedoch ebenfalls mehr Zeit für den ersten Lenkradkontakt. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass sowohl die Übernahmesituation als auch die fahrfremde Tätigkeit von hoher Komplexität waren und sich diese starke Doppelbelastung auch auf vorwiegend motorische Prozesse auswirkte. Diese Effekte blieben auch nach Ausschluss aller Fahrer, die das Tablet in den Händen hielten und dadurch nicht nur kognitiv, sondern auch manuell beansprucht waren, erhalten. Auch eine rein visuell-kognitive Ablenkung führte hier also zu verzögerten Fahrerreaktionen und beeinträchtigter Übernahmequalität. Die Ausführung eines Bremseneingriffes wurde hingegen durch kognitive Beanspruchung kaum beeinflusst. Fahrer mit schwieriger Aufgabe reagierten entgegen der Erwartungen sogar etwas schneller als Fahrer mit geringerer kognitiver Belastung, auch wenn sich dieser Unterschied statistisch als nicht signifikant erwies.

Der Einfluss kognitiver Beanspruchung scheint hier also abhängig vom Manöver und dem erforderlichen Fahrereingriff zu sein, wofür zwei mögliche Erklärungsansätze denkbar sind. Zum

einen scheinen vor allem stark abgelenkte Fahrer instinktiv mit einem Bremsengriff reagiert zu haben, um die Situation zu deeskalieren und Zeit zu gewinnen. Hierauf deuten auch andere Studien hin (Gold, Damböck, Lorenz et al., 2013; Lorenz & Hergeth, 2015; Louw et al., 2015). Diese Fahrer könnten in der Bremssituation in reflexhafter Weise sehr schnell reagiert haben – möglicherweise ohne die Situation tiefergehend verarbeitet zu haben. Zum anderen sind Unterschiede in der Valenz des Hinweisreizes und der Komplexität der erforderlichen Fahrerreaktion als Erklärung denkbar. Das in der Bremssituation relativ knapp vor dem Fahrer einscherende Fahrzeug ist zum einen perzeptuell ein eher leicht wahrnehmbarer Reiz, zum anderen besitzt es einen stark handlungsauffordernden Charakter und könnte unwillkürlich mit der Ausführung eines Bremsengriffs verbunden sein. Hiervon könnten Fahrer mit einer durch die intensive Beschäftigung mit einer fahrfremden Tätigkeit gesteigerten Wachsamkeit profitieren, da weniger eine tiefe Verarbeitung der Situation, als vielmehr eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit erforderlich ist. Dass es sich beim Bremsengriff tatsächlich um eine stark internalisierte Reaktion handelt, wird auch durch die gefundenen Lerneffekte unterstrichen: Während für die Ausführung des Lenkeingriffes ein deutlicher Lerneffekt vorlag, nahmen Fahrer den Bremsengriff unabhängig von der Reihenfolge der Übernahmesituationen ähnlich schnell vor. Im Unterschied dazu scheint in der Lenksituation sowohl die Perzeption der Übernahmesituation als auch die Stabilisierung des Fahrzeugs komplexer zu sein und mehr kognitive Ressourcen zu benötigen. Der Hinweisreiz, auf den die Fahrer in dieser Situation reagieren mussten – die laterale Spurbabweichung des eigenen Fahrzeugs – ist ein weniger offensichtlicher Stimulus als das plötzlich einscherende Fahrzeug. Nach erfolgtem Fahrereingriff erfordert die Stabilisierung des Fahrzeugs bei aktivem Seitenwind den ständigen Abgleich der lateralen Fahrzeugposition in Referenz zur Spurmitte sowie die Ausführung korrigierender Lenkeingriffe. Es kann vermutet werden, dass Fahrer aufgrund der gesteigerten kognitiven Anforderungen dieser Trackingaufgabe hierbei nicht von einer hohen Wachsamkeit profitieren, wenn durch die mit der Ausführung der fahrfremden Tätigkeit verbundenen Wechselkosten keine ausreichenden kognitiven Ressourcen zugänglich sind. Diese Annahmen legen nahe, dass zusätzliche Tätigkeiten während des automatisierten Fahrens sowohl ein ablenkendes als auch wachsamkeitssteigerndes Potenzial besitzen. Hierfür sprechen auch die subjektiven Bewertungen der Wachsamkeit und der mentalen Beanspruchung der Fahrer, welche beide durch das Ausführen einer fahrfremden Tätigkeit als höher bewertet wurden. Dies gibt erste Hinweise darauf, wie unterschiedliche Befunde in der Literatur zu erklären sind, die teilweise schnellere und teilweise beeinträchtigte Fahrerreaktionen infolge der Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten berichten.

Aus methodischer Sicht ist hinsichtlich Studie 3 kritisch anzumerken, dass in beiden untersuchten Übernahmesituationen nicht nur die Art des Fahrereingriffs variiert wurde, sondern verschiedene Szenarien umgesetzt wurden, die sich auch in weiteren Merkmalen unterscheiden haben könnten. So kann nicht mit letzter Sicherheit abgeleitet werden, ob die gefundenen Ergebnisse auf Unterschiede in der Ausführung von Lenk- und Bremsingriffen zurückzuführen sind oder auf andere Faktoren wie die Komplexität oder Kritikalität der Situationen, die Perception und kognitive Verarbeitung beeinflusst haben könnten.

### 3 Allgemeine Diskussion

Die Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge, bei denen Fahrer das System und die Fahrumgebung erstmals nicht mehr überwachen müssen (Gasser et al., 2012), wird für die nächsten Jahre erwartet (Cacilo et al., 2015; Underwood, 2015). Mit steigendem Automationsgrad kommt bei Fahrern dabei zunehmend der Wunsch auf, die Fahrtzeit angenehm und effizient zu nutzen (Kyriakidis et al., 2015; Schoettle & Sivak, 2014) und es muss verstärkt von einem abgelenkten Fahrer ausgegangen werden. Dieser muss jedoch nach wie vor in der Lage sein, die Fahrzeugführung im Falle einer erreichten Systemgrenze adäquat und sicher übernehmen zu können. Der Prozess der Fahrerübernahme wird vor diesem Hintergrund zu einem der zentralen sicherheitsrelevanten Aspekte bei der Entwicklung hochautomatisierter Systeme. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit ebendiesem Thema. Ziel war die Untersuchung der Fahrerübernahme während des hochautomatisierten Fahrens, wobei besonderes Augenmerk auf den Einfluss fahrfremder Tätigkeiten gelegt wurde. Drei Forschungsfragen sollten hierzu beantwortet werden: (1) Welche Prozesse laufen während der Fahrerübernahme ab? (2) Wie kann visuelle Ablenkung und Übernahmebereitschaft der Fahrer während einer automatisierten Fahrt erkannt werden? (3) Wie wirken sich visuell-kognitive und manuelle Beanspruchung durch fahrfremde Tätigkeiten auf die Übernahmeleistung der Fahrer aus?

In den folgenden Kapiteln werden Befunde der zur Untersuchung dieser Fragestellungen durchgeführten Studien unter Einbeziehung weiterer Literatur diskutiert.

#### **3.1 Ablauf der Fahrerübernahme**

Die im Rahmen von Studie 1 (Zeeb et al., 2015) postulierten grundlegenden Prozesse der Fahrerübernahme decken sich weitestgehend mit weiteren veröffentlichten Modellen der Fahrerübernahme (Gold & Bengler, 2014; Petermeijer et al., 2015). Ein wesentlicher Unterschied zu den Annahmen von Petermeijer et al. (2015) besteht darin, dass Übernahmezeit von diesen Autoren als der erste Kontakt mit dem Lenkrad definiert wird, womit zeitgleich die Handlungsausführung beginnen soll. Die vorliegenden Studien 1, 2 und 3 zeigen jedoch deutlich, dass Fahrer mit dem ersten Lenkradkontakt nicht zwangsläufig auch mit der Ausführung des eigentlichen Manövers beginnen, v.a. wenn die Situation keinen unmittelbaren Fahrereingriff erfordert. Eine Differenzierung von Lenkradkontakt und Fahrereingriff ist daher angemessen.

Hinsichtlich Einflussfaktoren auf die Fahrerübernahme wurde angenommen, dass sich verschiedene Variablen teilweise selektiv auf die zugrundeliegenden Subprozesse auswirken. So wurde erwartet, dass zusätzliche visuell-kognitive Beanspruchung des Fahrers durch fahrfremde Tätigkeiten zwar die kognitive Verarbeitung der Übernahme-situation beeinträchtigt, die Ausführung der motorischen Prozesse jedoch kaum beeinflusst. Die vorliegenden Studien 1 und 2 bestätigen diese Annahme. Es zeigte sich, dass die Ausführung visuell-kognitiv beanspruchender Tätigkeiten zwar den Zeitpunkt des Fahrereingriffs und die Qualität der Übernahme beeinflusste, nicht jedoch die Dauer bis der Fahrer die Hände ans Lenkrad genommen hat und rein motorisch ein Eingriff möglich ist. Ähnliches ergab eine Studie von Gold et al. (2016), in der die Verkehrsdichte der Übernahme-situation systematisch variiert wurde, was die Perzeption und kognitive Verarbeitung der Situation beeinflusste. Eine hohe Verkehrsdichte verzögerte hier zwar den Fahrereingriff, nicht jedoch den ersten Lenkradkontakt. Studie 3 zeigte jedoch entgegen dieser Befunde, dass visuell-kognitive Fahrerablenkung durchaus einen Einfluss auf die Dauer bis zum ersten Lenkradkontakt haben kann. Dies könnte bei hochgradig beanspruchenden oder stark einnehmenden Tätigkeiten der Fall sein, wie sie in Studie 3 umgesetzt wurden, von denen der Fahrer sich erst mit einer gewissen Latenz löst. In diesem Falle scheint es zu einer allgemein verzögerten Fahrerreaktion zu kommen, die sich nicht nur auf kognitive Prozesse beschränkt. Ähnliches scheint für manuelle Beanspruchung zu gelten. Auch hier wurde davon ausgegangen, dass sich zusätzliche manuelle Beanspruchung des Fahrers relativ isoliert auf die motorische Handlungsausführung auswirkt, wohingegen die kognitive Verarbeitung der Situation parallel dazu relativ unbeeinträchtigt ablaufen sollte. Studie 3 ergab jedoch, dass Fahrer, die das Tablet in den Händen hielten, im Durchschnitt auch mehr Zeit benötigten, um ihre visuelle Aufmerksamkeit auf die Straße zu richten. Dadurch beginnt auch die kognitive Verarbeitung der Situation verzögert, da hierfür visuelle Informationen unabdingbar sind.

Diese Ergebnisse zeigen, dass sich Einflussfaktoren grundsätzlich nicht rein modalitätsspezifisch auf Teilprozesse der Fahrerübernahme auswirken, sondern auch eine generelle Verzögerung der Fahrerreaktion bewirken können. Dies unterstreicht die Relevanz, ein ganzheitliches Verständnis des Einflusses fahrfremder Tätigkeiten zu erlangen und Kenntnis über den Fahrerzustand zu besitzen.

### **3.2 Erkennung von Fahrerablenkung während des automatisierten Fahrens**

Um zu gewährleisten, dass auch ein abgelenkter Fahrer die Fahrzeugführung jederzeit wieder übernehmen kann, ist die Kenntnis von Zustand und Übernahmebereitschaft des Fahrers während hochautomatisierter Fahrten von großer Bedeutung (Cacilo et al., 2015; Gasser et al., 2015). In Studie 1 konnte ein Zusammenhang zwischen dem Blickverhalten der Fahrer, d.h. der Ausprägung der Blickabwendungen von der Verkehrsumgebung, und deren Übernahmebereitschaft gezeigt werden. Es wird vermutet, dass das Blickverhalten der Fahrer deren Ablenkung widerspiegelt, was durch weitere, zwischenzeitlich veröffentlichte Studien unterstützt wird. Gold et al. (2016) fanden während automatisierter Fahrten bei kognitiv beanspruchten Fahrern eine geringere horizontale Streuung der Blicke als bei Fahrern ohne fahrfremde Tätigkeit. Braunagel, Kasneci, Stolzmann und Rosenstiel (2015) konnten darüber hinaus zeigen, dass sich während des automatisierten Fahrens sogar verschiedene Arten von Tätigkeiten (z.B. Video schauen oder einen Text lesen) anhand des Kopf- und Blickverhaltens der Fahrer unterscheiden lassen. Ein Zusammenhang zwischen Ablenkung und Blickverhalten der Fahrer wurde auch für manuelles Fahren berichtet (Green, 1999; Horrey & Wickens, 2007; Victor et al., 2005). Die Befunde der vorliegenden Arbeit zeigen nicht nur, dass diese Beziehung grundsätzlich auf automatisiertes Fahren übertragen werden kann, sondern belegen darüber hinaus einen Zusammenhang mit der Übernahmefähigkeit der Fahrer. Dieser Nachweis ist von großer Relevanz, da das Blickverhalten nur dann auch als Indikator für die Übernahmebereitschaft herangezogen werden kann.

Es muss berücksichtigt werden, dass Studie 1 lediglich zum Ziel hatte, die grundsätzliche Machbarkeit einer Erkennung der Übernahmebereitschaft visuell abgelenkter Fahrer zu untersuchen. Die Entwicklung eines umfassenden Ansatzes zur Fahrerzustandserkennung während des hochautomatisierten Fahrens kann und sollte im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden. Hierfür müssen neben visueller Ablenkung auch Methoden zur Erkennung kognitiver und manueller Beanspruchung sowie weiterer Zustände wie Müdigkeit gefunden werden. Weiterhin ist bislang noch nicht ausreichend untersucht, ob und in welchem Ausmaß das Blickverhalten der Fahrer während des automatisierten Fahrens von weiteren Faktoren beeinflusst wird. So berichten Hergeth, Lorenz, Vilimek und Krems (2016) einen Zusammenhang zwischen dem Blickverhalten und dem Vertrauen des Fahrers in die Automation. Auch die Dauer einer automatisierten Fahrt sowie die generelle Nutzungshäufigkeit und Expertise mit hochautomatisier-

ten Systemen könnte das Blickverhalten der Fahrer langfristig beeinflussen. Vor diesem Hintergrund stellt die Entwicklung einer umfassenden Fahrerzustandserkennung eine große Herausforderung dar. Welche Wichtigkeit der Fahrerzustand jedoch für die Übernahmbereitschaft spielt, wird bei näherer Betrachtung des Einflusses fahrfremder Tätigkeiten deutlich.

### ***3.3 Einfluss fahrfremder Tätigkeiten auf die Fahrerübernahme***

Bisherige Forschung liefert keine einheitlichen Ergebnisse hinsichtlich der Frage, welchen Einfluss fahrfremde Tätigkeiten auf die Übernahmeleistung haben. Aus diesem Grund wurde in den Studien 2 (Zeeb, Buchner et al., 2016) und 3 (Zeeb, Härtel, Buchner & Schrauf, 2016) näher untersucht, wie sich zusätzliche visuell-kognitive und motorische Beanspruchung auf die Übernahmeleistung der Fahrer in unterschiedlichen Szenarien auswirkt. Diese Studien deuten darauf hin, dass die Auswirkungen fahrfremder Tätigkeiten auf die Fahrerübernahme von mehreren Faktoren abhängen. Es können Rückschlüsse auf drei mögliche Einflussvariablen gezogen werden: (1) die Modalität der fahrfremden Tätigkeit (manuell vs. visuell-kognitiv), (2) die Art und Komplexität des erforderlichen Fahrereingriffs (Quer- vs. Längsführung) sowie (3) die Kritikalität der Übernahmesituation. Hierzu werden im Folgenden Befunde zusammengefasst und diskutiert.

Studie 3 legt nahe, dass sich sowohl kognitive als auch manuelle Beanspruchung auf den Übernahmeprozess auswirkt, der Einfluss jedoch von der Art des Fahrereingriffs abhängt. Das Halten eines Tablets in den Händen beeinflusste sowohl Eingriffe in die Quer- als auch Längsführung, beeinträchtigte jedoch wie zu erwarten die Ausführung eines Lenkeingriffes stärker als die eines Bremsingriffes. Vor dem Hintergrund, dass die Nutzung von Smartphones und anderen elektronischen Geräten bereits heute weit verbreitet ist und während des automatisierten Fahrens vermutlich weiter zunimmt (Kyriakidis et al., 2015), liefert dies wichtige Erkenntnisse zum Ablenkungspotenzial derartiger fahrfremder Tätigkeiten. Vor allem bei einer hohen zeitlichen Dringlichkeit der Übernahmesituation scheint die Verwendung von Halterungen für die Nutzung elektronischer Geräte angebracht, um eine schnelle und sichere Fahrerübernahme zu unterstützen. Kann dem Fahrer hingegen ein ausreichend langes Zeitbudget für die Übernahme zur Verfügung gestellt werden, wäre auch das Halten von Gegenständen in den Händen denkbar. Damit spielt letztlich die Gestaltung der Systemausprägung und die Festlegung eines vom System vorgegeben Zeitfensters zur Übernahme eine maßgebliche Rolle.

Im Unterschied zu manueller Beanspruchung erwies sich der Einfluss visuell-kognitiv beanspruchender fahrfremder Tätigkeiten als vielschichtiger. Studie 3 deutet darauf hin, dass Art

und Komplexität der erforderlichen Fahrerreaktion deren Auswirkungen maßgeblich beeinflussen. Die Ausführung derartiger Tätigkeiten könnte die Fahrerübernahme lediglich gering beeinträchtigen, wenn der Fahrereingriff eine instinktiv ausführbare Handlung umfasst, die keine komplexe kognitive Verarbeitung erfordert, wie es auf den Bremsingriff in Studie 3 zutrifft. In diesem Falle könnte eine erhöhte Aktivität und gesteigerte Wachsamkeit eine schnelle Reaktion sogar begünstigen. Verlangt die Situation hingegen eine umfangreichere Perzeption oder ein tiefgehendes Verständnis, wie es für das Lenkmanöver in Studie 3 argumentiert wird, könnten negative Auswirkungen durch die Beanspruchung kognitiver Ressourcen überwiegen. Diese Annahmen könnten auch die unterschiedlichen Befunde weiterer Studien erklären. So wurde auch in der Untersuchung von Neubauer et al. (2012) ein Bremsingriff untersucht und positive Effekte durch die Nutzung eines Mobiltelefons während der automatisierten Fahrt berichtet. In den Studien von Körber et al. (2016) sowie Feldhütter et al. (2016) bestand die Übernahmesituation beide Male aus einer Blockierung der eigenen Fahrspur, sodass die Fahrer einen manuellen Spurwechsel vornehmen mussten. In beiden Studien wurde eine beeinträchtigte Übernahmeleistung abgelenkter Fahrer berichtet.

Neben der Modalität der durch die fahrfremde Tätigkeit beanspruchten Ressourcen und der Art des Fahrereingriffs, spielt vermutlich auch die Kritikalität und zeitliche Dringlichkeit der Übernahmesituation eine wichtige Rolle. Dies wird bei Vergleich von Studie 2 und 3 deutlich. In beiden Studien wurde der Verlust der Spurmarkierung bei Seitenwind in einer Kurve als Übernahmesituation untersucht. Doch obwohl der erforderliche Fahrereingriff identisch war, zeigten sich in Studie 2 im Gegensatz zu Studie 3 geringe Effekte der zusätzlichen Tätigkeit auf die Reaktionszeiten. Auffallend ist, dass in Studie 2 selbst derselbe Aufgabentyp wie in Studie 3 (Nachrichtentext lesen) zu keiner Verzögerung der Reaktionsgeschwindigkeit führte. Eine mögliche Erklärung für diese unterschiedlichen Befunde ist die höhere Kritikalität der Übernahmesituation, die in Studie 3 gezielt umgesetzt wurde. Es kann vermutet werden, dass die situativen Anforderungen in Studie 2 vergleichsweise gering waren, sodass sich die zusätzliche visuell-kognitive Beanspruchung des Fahrers durch die fahrfremde Tätigkeit nicht negativ auf dessen Reaktionszeit auswirkte. In Studie 3 hingegen kam es durch die gesteigerten situativen Anforderungen bei den abgelenkten Fahrern möglicherweise zu einem Überschreiten der zugänglichen kognitiven Kapazitäten, wodurch diese im Vergleich zu Fahrern ohne fahrfremde Tätigkeit mehr Zeit für einen Fahrereingriff benötigten. Unterstützt wird diese Annahme durch Befunde zum manuellen Fahren, die ebenfalls einen Einfluss der Anforderungen der Fahraufgabe auf die Auswirkungen von Fahrerablenkung fanden. So berichten verschiedene Autoren,

dass eine komplexe Fahrumgebung, z.B. durch eine hohe Verkehrsdichte oder schlechte Wetterbedingungen, negative Effekte durch die Ausführung einer Nebentätigkeit weiter verstärkt (Brookhuis, de Vries & de Waard, 1991; Cooper & Zheng, 2002; Strayer, Drews & Johnston, 2003). Dass die Komplexität der Situation das Übernahmeverhalten der Fahrer grundsätzlich beeinflussen kann, zeigen auch weitere Studien zum hochautomatisierten Fahren (Gold et al., 2016; Radlmayr et al., 2014). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass in Studie 2 trotz lediglich geringer Unterschiede in den Reaktionszeiten dennoch eine verringerte Übernahmequalität infolge von Fahrerablenkung zu finden war. Dies unterstreicht, dass abgelenkte Fahrer bei ausreichender Zeitreserve und vergleichsweise geringen situativen Anforderungen die Fahrzeugführung zwar scheinbar ähnlich schnell, nicht jedoch ähnlich gut übernehmen können wie nicht abgelenkte Fahrer.

Ein weiterer Faktor, der die Auswirkungen fahrfremder Tätigkeiten moderieren könnte, ist die Dauer der automatisierten Fahrt. Denkbar ist, dass sich ein aufmerksamkeitssteigernder Effekt durch die Ausführung fahrfremder Tätigkeiten erst nach einer hinreichend langen automatisierten Fahrt zeigt, wenn sich auch Minderungen der Vigilanz deutlicher auswirken. Der Übernahmesituation in der Untersuchung von Neubauer et al. (2012), die schnellere Reaktionen abgelenkter Fahrer berichten, ging eine 25-minütige durchgängig automatisierte Fahrt voraus. In den Studien 2 und 3 der vorliegenden Arbeit fuhr der Fahrer dagegen nie länger als 11:30 min durchgängig automatisiert bevor eine Übernahmesituation erreicht wurde. Dies könnte bedeuten, dass sich potenzielle Beeinträchtigungen der Vigilanz und dementsprechend auch diesen entgegenwirkenden Effekte erst nach einer ausreichend langen Fahrtzeit zeigen. Tatsächlich wird in klassischen Vigilanzuntersuchungen ein erster Vigilanzabfall zwar häufig bereits nach etwa 15 Minuten gefunden (Teichner, 1974), oft wird jedoch erst ab etwa 20- bis 35-minütiger Aufgabendauer der Punkt erreicht, ab dem die Überwachungsleistung nur noch graduell abnimmt (Mackworth, 1948; Parasuraman, Warm & Dember, 1987). Ein erster gezielter Vergleich unterschiedlich langer Automationsdauern ergab zwar kaum Unterschiede in der Übernahmeleistung der Fahrer (5 vs. 20 Minuten; Feldhütter et al., 2016), jedoch könnte auch diese automatisierte Fahrt noch zu kurz gewesen sein. Oron-Gilad und Ronen (2007) konnten das Einsetzen von Ermüdungssymptomen, gemessen an physiologischen Maßen wie der Herzratenvariabilität oder dem Augenöffnungsgrad der Fahrer, nach einer 40-50-minütigen nicht-automatisierten Fahrt im Fahrsimulator nachweisen. Dieselben Autoren zeigten in einer weiteren Studie, dass die Ausführung bestimmter Nebentätigkeiten nach einer 50-minütigen nicht-automatisierten Fahrt dem Entstehen von Ermüdung entgegenwirkt (Oron-Gilad et al.,

2008). In zukünftigen Studien zum hochautomatisierten Fahren sollten daher verstärkt Fahrten von vergleichbarer Dauer untersucht werden.

Die dargelegten Befunde leisten einen Beitrag zur Entwicklung automatisierter Systeme, deren Einführung die zukünftige Mobilität grundlegend verändern kann. Es muss davon ausgegangen werden, dass vor allem mit häufiger Nutzung und zunehmendem Vertrauen ins System bei einem Teil der Fahrer verstärkt der Wunsch aufkommen wird, ihre Fahrtzeit angenehmer und effizienter zu nutzen. Solange der Fahrer dabei noch immer als Rückfallebene dient, wie es während des hochautomatisierten Fahrens der Fall ist, ist daher ein umfassendes Verständnis der Auswirkungen fahrfremder Tätigkeiten auf den Fahrer essenziell. Dabei wird vom Fahrer nicht erwartet, spontan eingriffsbereit zu sein, sondern nur nach einer angemessen langen Vorwarnzeit. Für die Festlegung dieses Zeitfensters ist die Kenntnis von Ablenkungseffekten von großer Wichtigkeit. Die vorliegende Arbeit legt nahe, dass fahrfremde Tätigkeiten während automatisierter Fahrten sowohl ein wachsamkeitssteigerndes als auch ablenkendes Potenzial besitzen könnten. Die letztlichen Auswirkungen auf die Übernahmeleistung der Fahrer scheinen dabei sowohl von der Modalität der fahrfremden Tätigkeit, als auch vom erforderlichen Fahrereingriff und der Kritikalität der Übernahmesituation abzuhängen. Es kann angenommen werden, dass die Übernahmeleistung der Fahrer durch ein komplexes Zusammenspiel dieser und weiterer Faktoren, wie z.B. der vorausgegangenen Automationsdauer, beeinflusst wird. Entscheidend erscheint weniger die durch einen dieser Faktoren entstehenden Beanspruchung des Fahrers zu sein, als vielmehr die aus der Interaktion dieser Einflussgrößen resultierenden gesamtheitlichen Anforderungen. Eine Erkennung des Fahrerzustandes bietet dabei die Möglichkeit, die Übernahmefähigkeit des Fahrers abzuschätzen, wodurch hochautomatisierte Fahrfunktionen zusätzlich abgesichert werden können. Diese Ansätze sollten weiter verfolgt werden, damit zukünftige Nutzer automatisierter Systeme ihre Fahrtzeit nach ihren Wünschen gestalten können und eine sichere Fahrerübernahme nichtsdestotrotz gewährleistet ist.

## Literaturverzeichnis

- Bailey, N. R. & Scerbo, M. W. (2007). Automation-induced complacency for monitoring highly reliable systems. The role of task complexity, system experience, and operator trust. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8 (4), 321-348.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19 (6), 775-779.
- Braunagel, C., Kasneci, E., Stolzmann, W. & Rosenstiel, W. (2015). Driver-activity recognition in the context of conditionally autonomous driving. In *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2015)* (S. 1652-1657). Piscataway: IEEE.
- Brookhuis, K. A., de Vries, G. & de Waard, D. (1991). The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 23 (4), 309-316.
- Brookhuis, K. A., van Driel, C. J. G., Hof, T., van Arem, B. & Hoedemaeker, M. (2008). Driving with a congestion assistant; mental workload and acceptance. *Applied Ergonomics*, 40 (6), 1019-1025.
- Brown, I. D. (1994). Driver fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36 (2), 298-314.
- Buld, S., Tietze, H. & Krüger, H.-P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 161-187). Berlin: Springer.
- Cacilo, A., Schmidt, S., Wittlinger, P., Herrmann, F., Bauer, W., Sawade, O. et al. (2015). *Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen - Industriepolitische Schlussfolgerungen*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO).
- 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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54 (5), 747-761.
- Cohen, A. S. & Hirsig, R. (1991). The role of foveal vision in the process of information input. In A. G. Gale (Hrsg.), *Vision in vehicles - III* (S. 153-160). Amsterdam: Elsevier.
- Cooper, P. J. & Zheng, Y. (2002). Turning gap acceptance decision-making. The impact of driver distraction. *Journal of Safety Research*, 33 (3), 321-335.
- Corbetta, M. & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3 (3), 201-215.
- Crundall, D. & Underwood, G. (2011). Visual attention while driving. In B. Porter (Hrsg.), *Handbook of traffic psychology* (S. 137-148). London: Academic Press.
- Damböck, D., Weissgerber, T., Kienle, M. & Bengler, K. (2013). Requirements for cooperative vehicle guidance. In *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)* (S. 1656-1661). Piscataway: IEEE.

- De Winter, J. C. F., Happee, R., Martens, M. & 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.
- Dekker, S. W. A. & Hollnagel, E. (2004). Human factors and folk models. *Cognition, Technology & Work*, 6 (2), 79-86.
- Dekker, S. W. A. & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or Abracadabra? Progress on human-automation co-ordination. *Cognition, Technology & Work*, 4 (4), 240-244.
- Dickmanns, E. D., Behringer, R., Dickmanns, D., Hildebrandt, T., Maurer, M., Thomanek, F. et al. (1994). The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium* (S. 68-73). Piscataway: IEEE.
- Dingus, T., Klauer, S., Neale, V., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J. et al. (2006). *The 100-car naturalistic driving study, phase II – results of the 100-car field experiment* (DOT HS 810 593). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).
- Egeth, H. E. & Yantis, S. (1997). Visual attention: Control, representation, and time course. *Annual Review of Psychology*, 48 (1), 269-297.
- Electronic Highway of the Future (April 1958). *Science Digest*, S. 18-21.
- Endsley, M. R. (1995a). Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 65-84.
- Endsley, M. R. (1995b). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 32-64.
- Endsley, M. R. & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42 (3), 462-492.
- Endsley, M. R. & Kiris, E. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (2), 381-394.
- Engström, J. A., Johansson, E. & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8 (2), 97-120.
- Feldhütter, A., Gold, C., Schneider, S. & Bengler, K. (2016, März). *How the duration of automated driving influences take-over performance and gaze behavior*. Beitrag präsentiert auf dem 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Arbeit in komplexen Systemen - digital, vernetzt, human?!, Aachen.
- Flach, J. M. (1995). Situation awareness: Proceed with caution. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 149-157.
- Foley, J., Young, R., Angell, L. & Domeyer, J. (2013). Towards operationalizing driver distraction. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design* (S. 57-63). Iowa City: The University of Iowa.

- Frankmann, J. P. & Adams, J. A. (1962). Theories of vigilance. *Psychological Bulletin*, 59 (4), 257-272.
- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J. et al. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fahrzeugtechnik* (Bd. 83). Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW.
- Gasser, T. M., Schmidt, E. A., Bengler, K., Chiellino, U., Diederichs, F., Eckstein, L. et al. (2015). *Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren - AG Forschung*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Gershon, P., Ronen, A., Oron-Gilad, T. & Shinar, D. (2009). The effects of an interactive cognitive task (ICT) in suppressing fatigue symptoms in driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12 (1), 21-28.
- Gold, C. & Bengler, K. (2014). Taking over control from highly automated vehicles. In N. A. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico & A. Vallicelli (Hrsg.), *Advances in human aspects of transportation - Part II* (S. 64-69). Louisville: AHFE Conference.
- Gold, C., Damböck, D., Bengler, K. & Lorenz, L. (2013, November). *Partially automated driving as a fallback level of high automation*. Beitrag präsentiert auf der 6. Tagung Fahrerassistenz: Der Weg zum automatischen Fahren, 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* (Bd. 57, S. 1938-1942). San Diego: SAGE Publications.
- Gold, C., Korber, M., Lechner, D. & Bengler, K. (2016). Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: The role of traffic density. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58 (4), 642-652.
- Gold, C., Lorenz, L. & Bengler, K. (2014, Juni). *Influence of automated brake application on take-over situations in highly automated driving scenarios*. Beitrag präsentiert auf dem FI-SITA World Automotive Congress, Maastricht.
- Green, M. (2000). "How long does it take to stop?" Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transportation Human Factors*, 2 (3), 195-216.
- Green, P. (1999). *Visual and task demands of driver information systems* (UMTRI-98-16). Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan.
- Green, P. (2000). Crashes induced by driver information systems and what can be done to reduce them. In *Proceedings of the Convergence 2000 Conference* (S. 27-36). Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P. et al. (2003). Evaluation of driver distraction using an event detection paradigm. *Journal of the Transportation Research Board*, 1843 (1), 1-9.
- Gugerty, L. J. (1997). Situation awareness during driving: Explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3 (1), 42-66.

- Hancock, P. A. & Parasuraman, R. (1992). Human factors and safety in the design of intelligent vehicle-highway systems (IVHS). *Journal of Safety Research*, 23 (4), 181-198.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I. & Eizenman, M. (2002). *The impact of cognitive distraction on visual behaviour and vehicle control* (TP 13889 E). Ontario: Transport Canada.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139-183.
- Helton, W. S., Dember, W. N., Warm, J. S. & Matthews, G. (1999). Optimism, pessimism, and false failure feedback. Effects on vigilance performance. *Current Psychology*, 18 (4), 311-325.
- 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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58 (3), 509-519.
- Hipp, E., Schwertberger, W. & Gwehenberger, J. (2006). Effective potential of driver assistance systems in commercial vehicles. *ATZelektronik*, 1 (3), 6-9.
- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J. & Brown, J. (2006). Driver distraction. The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38 (1), 185-191.
- Horrey, W. & Wickens, C. D. (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48 (1), 196-205.
- Horrey, W. & Wickens, C. D. (2007). In-vehicle glance duration: distributions, tails, and model of crash risk. *Transportation Research Record*, 2018 (1), 22-28.
- ISO/TS (2012). *ISO International Standard ISO/TS 14198 - Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems - Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems*. Genf: International Organization for Standardization.
- Jamson, A. H. & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8 (2), 79-96.
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. & Lai, F. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation Research Part C*, 30, 116-125.
- Kaber, D. B. & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5 (2), 113-153.
- Kaber, D. B., Liang, Y., Zhang, Y., Rogers, M. L. & Gangakhedkar, S. (2012). Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15 (5), 491-501.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

- Klauer, S., Dingus, T., Neale, V., Sudweeks, J. & Ramsey, D. (2006). *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data* (DOT HS 810 594). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).
- Körber, M., Cingel, A., Zimmermann, M. & Bengler, K. (2015). Vigilance decrement and passive fatigue caused by monotony in automated driving. *Procedia Manufacturing*, 3, 2403-2409.
- 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.
- Kyriakidis, M., Happee, R. & de Winter, J. C. F. (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.
- Langer, I., Abendroth, B. & Bruder, R. (2015). Fahrerzustandserkennung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (3. Aufl., S. 687-794). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Leighty, R. D. (1986). *DARPA ALV summary*. Fort Belvoir: U.S. Army Engineer Topographic Laboratories Fort Belvoir.
- Lorenz, L. & Hergeth, S. (2015, November). *Einfluss der Nebenaufgabe auf die Überwachungsleistung beim teilautomatisierten Fahren*. Beitrag präsentiert auf der 8. VDI Tagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“, Braunschweig.
- Louw, T., Merat, N. & Jamson, A. H. (2015). Engaging with highly automated driving: To be or not to be in the loop? In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (S. 190-196). Iowa City: The University of Iowa.
- Ma, R. & Kaber, D. B. (2005). Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (10), 939-953.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1 (1), 6-21.
- Mackworth, N. H. (1950). *Researches on the measurement of human performance* (Medial Research Council Special Report Nr. 268). London: H.M. Stationery Office.
- Matthews, G. (2000). *Human performance. Cognition, stress, and individual differences*. Hove: Psychology Press.
- Merat, N. & Jamson, A. H. (2009). How do drivers behave in a highly automated car? In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (S. 514-521). Iowa City: The University of Iowa.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54 (5), 762-771.

- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F., Daly, M. & Carsten, O. (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.
- 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.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2012). *Visual-manual NHTSA driver distraction guidelines for in-vehicle electronic devices*. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation.
- Naujoks, F., Mai, C. & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions. In N. A. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico & A. Vallicelli (Hrsg.), *Advances in human aspects of transportation - Part I* (S. 2099-2106). Louisville: AHFE Conference.
- Neubauer, C., Matthews, G. & Saxby, D. (2012). The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 56<sup>th</sup> Annual Meeting* (S. 1987-1991). Santa Monica: SAGE Publications.
- Neubauer, C., Matthews, G. & Saxby, D. (2014). Fatigue in the automated vehicle. Do games and conversation distract or energize the driver? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 58<sup>th</sup> Annual Meeting* (S. 2053-2057). Santa Monica: SAGE Publications.
- Niederée, U. & Vollrath, M. (2009). Systemausfälle bei Längsführungsassistenten – Sind bessere Systeme schlechter? In A. Lichtenstein, C. Stöbel & C. Clemens (Hrsg.), *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (Bd. 22, S. 38-43). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Nunes, L. & Recarte, M. (2002). Cognitive demands of hands-free-phone conversation while driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5 (2), 133-144.
- Oron-Gilad, T. & Ronen, A. (2007). Road characteristics and driver fatigue: A simulator study. *Traffic Injury Prevention*, 8 (3), 281-289.
- Oron-Gilad, T., Ronen, A. & Shinar, D. (2008). Alertness maintaining tasks (AMTs) while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (3), 851-860.
- Parasuraman, R., Molloy, R. & Singh, I. (1993). Performance consequences of automation-induced complacency. *The international Journal of Aviation Psychology*, 3 (1), 1-23.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation. Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2 (2), 140-160.
- Parasuraman, R., Warm, J. S. & Dember, W. N. (1987). Vigilance: Taxonomy and utility. In L. S. Mark, J. S. Warm & R. L. Huston (Hrsg.), *Ergonomics and Human Factors* (S. 11-32). New York: Springer New York.

- Peng, Y., Boyle, L. N., Ghazizadeh, M. & Lee, J. D. (2013). Factors affecting glance behavior when interacting with in-vehicle devices: Implications from a simulator study. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design* (S. 474-480). Iowa City: The University of Iowa.
- Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., Josten, J. & Eckstein, L. (2015). „Bitte übernehmen Sie das Fahren!“ Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien. In *Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), AAET 2015 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 346-369). Braunschweig: ITS Niedersachsen e.V.
- Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T. & Mergl, C. (2013, November). *Wie lange braucht der Fahrer? - Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt*. Beitrag präsentiert auf der 6. Tagung Fahrerassistenz „Der Weg zum automatischen Fahren“, München.
- Petermeijer, S. M., de Winter, J. C. F. & Bengler, K. J. (2015). Vibrotactile displays. A survey with a view on highly automated driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17 (4), 897-907.
- Politis, I., Brewster, S. & Pollick, F. (2015). Language-based multimodal displays for the hand-over of control in autonomous cars. In G. Burnett (Hrsg.), *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (S. 3-10). New York: Association for Computing Machinery.
- 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 58<sup>th</sup> Annual Meeting* (S. 2063-2067). Santa Monica: SAGE Publications.
- Recarte, M. & Nunes, L. (2003). Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9 (2), 119-137.
- Regan, M. A., Hallett, C. & Gordon, C. (2011). Driver distraction and driver inattention: Definition, relationship and taxonomy. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (5).
- Rogers, M., Zhang, Y., Kaber, D. B. & Liang, Y. (2011). The effects of visual and cognitive distraction on driver situation awareness. In D. Harris (Hrsg.), *Engineering psychology and cognitive ergonomics* (S. 186-195). Berlin Heidelberg: Springer.
- Rudin-Brown, C. M. & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): Implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7 (2), 59-76.
- Ruscio, D., Ciceri, M. & Biassoni, F. (2015). How does a collision warning system shape driver's brake response time? The influence of expectancy and automation complacency on real-life emergency braking. *Accident Analysis & Prevention*, 77, 72-81.

- SAE International. (2014). *Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems* (Ground Vehicle Standard J3016). Warrendale: SAE International.
- Schittenhelm, H. (2013, Mai). *Advanced brake assist – real world effectiveness of current implementations and next generation enlargements by Mercedes-Benz*. Beitrag präsentiert auf der 23<sup>rd</sup> International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Seoul.
- Schoettle, B. & Sivak, M. (2014). *A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the U.S., the U.K., and Australia* (UMTRI-2014-21). Ann Arbor: Transportation Research Institute, University of Michigan.
- Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Petermann-Stock, I. & Othersen, I. (2015). The interaction between highly automated driving and the development of drowsiness. *Procedia Manufacturing*, 3, 6652-6659.
- Shinar, D., Tractinsky, N. & Compton, R. (2005). Effects of practice, age, and task demands, on interference from a phone task while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 37 (2), 315-326.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25 (9), 1081-1089.
- Stanton, N. A. & Young, M. S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48 (10), 1294-1313.
- Strayer, D. L., Drews, F. A. & Johnston, W. A. (2003). Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9 (1), 23-32.
- Takayama, L. & Nass, C. (2008). Assessing the effectiveness of interactive media in improving drowsy driver safety. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50 (5), 772-781.
- Teichner, W. H. (1974). The detection of a simple visual signal as a function of time of watch. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 16 (4), 339-352.
- Tijerina, L. (2000). *Issues in the evaluation of driver distraction associated with in-vehicle information and telecommunications systems*. East Liberty: Transportation Research Center Inc.
- Underwood, G. (2007). Visual attention and the transition from novice to advanced driver. *Ergonomics*, 50 (8), 1235-1249.
- Underwood, S. E. (2015). *Automated, connected, and electric vehicle systems. Expert forecast and roadmap for sustainable transportation*. Dearborn: Institute for Advanced Vehicle Systems, University of Michigan.
- Victor, T. W. (2005). *Keeping eye and mind on the road*. Dissertation, Universität Uppsala.

- Victor, T. W., Harbluk, J. L. & Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8 (2), 167-190.
- Vollrath, M., Schleicher, S. & Gelau, C. (2011). The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour – a driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (3), 1134-1139.
- Walch, M., Lange, K., Baumann, M. & Weber, M. (2015). Autonomous driving: Investigating the feasibility of car-driver handover assistance. In G. Burnett (Hrsg.), *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (S. 11-18). New York: Association for Computing Machinery.
- Warm, J. S., Dember, W. N. & Hancock, P. A. (1996). Vigilance and workload in automated systems. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and human performance: Theory and applications* (S. 183-200). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Warm, J. S., Parasuraman, R. & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50 (3), 433-441.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance* (S. 239-257). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Hrsg.), *Varieties of attention* (S. 63-102). New York: Academic Press.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3 (2), 159-177.
- Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. & Talleur, D. A. (2003). Attentional models of multitask pilot performance using advanced display technology. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45 (3), 360-380.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G. & Parasuraman, R. (2016). *Engineering psychology and human performance* (4. Aufl.). London, New York: Routledge Taylor & Francis Group.
- Wiener, E. & Curry, R. (1980). Flight-deck automation: Promises and problems. *Ergonomics*, 23 (10), 995-1011.
- Winner, H. & Schopper, M. (2015). Adaptive Cruise Control. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (3. Aufl., S. 851-891). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Young, K. L. & Regan, M. A. (2007). Driver distraction: A review of the literature. In I. Faulks, M. A. Regan, M. Stevenson, J. Brown, A. Porter & J. Irwin (Hrsg.), *Distracted driving* (S. 379-405). Sydney: Australasian College of Road Safety.
- Young, M. & Stanton, N. A. (2002a). Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3 (2), 178-194.

- Young, M. & Stanton, N. A. (2002b). Malleable attentional resources theory. A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44 (3), 365-375.
- Young, M. & Stanton, N. A. (2007a). Back to the future: Brake reaction times for manual and automated vehicles. *Ergonomics*, 50 (1), 46-58.
- Young, M. & Stanton, N. A. (2007b). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50 (8), 1324-1339.
- 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., Buchner, A. & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 230-239.
- Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A. & Schrauf, M. (2016). *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*. Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht.

## Einzelarbeiten

### Studie 1:

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.

### Studie 2:

Zeeb, K., Buchner, A. & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 92, 230-239.

### Studie 3:

Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A. & Schrauf, M. (2016). *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.* Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht.



# What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving



Kathrin Zeeb<sup>a,b,\*</sup>, Axel Buchner<sup>b</sup>, Michael Schrauf<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Daimler AG, Research and Development, Hanns-Klemm-Str. 45, D-71032 Böblingen, Germany

<sup>b</sup> Heinrich Heine University Düsseldorf, Department of Experimental Psychology, Universitätsstr. 1, D-40225 Düsseldorf, Germany

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 23 September 2014

Received in revised form 26 February 2015

Accepted 28 February 2015

Available online xxx

### Keywords:

Automated driving

Eye movements

Driver distraction

Driver take-over

Visual attention

Driving simulator

## ABSTRACT

In recent years the automation level of driver assistance systems has increased continuously. One of the major challenges for highly automated driving is to ensure a safe driver take-over of the vehicle guidance. This must be ensured especially when the driver is engaged in non-driving related secondary tasks. For this purpose it is essential to find indicators of the driver's readiness to take over and to gain more knowledge about the take-over process in general.

A simulator study was conducted to explore how drivers' allocation of visual attention during highly automated driving influences a take-over action in response to an emergency situation. Therefore we recorded drivers' gaze behavior during automated driving while simultaneously engaging in a visually demanding secondary task, and measured their reaction times in a take-over situation.

According to their gaze behavior the drivers were categorized into "high", "medium" and "low-risk". The gaze parameters were found to be suitable for predicting the readiness to take-over the vehicle, in such a way that high-risk drivers reacted late and more often inappropriately in the take-over situation. However, there was no difference among the driver groups in the time required by the drivers to establish motor readiness to intervene after the take-over request.

An integrated model approach of driver behavior in emergency take-over situations during automated driving is presented. It is argued that primarily cognitive and not motor processes determine the take-over time. Given this, insights can be derived for further research and the development of automated systems.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Over the last decades a highly visible trend toward increasing automation has characterized the automotive industries (Stanton and Marsden, 1996). Different levels of automated driving can be defined depending on how strong the system intervenes in the longitudinal and lateral control of the vehicle and whether or not the driver needs to monitor the system, (Gasser et al., 2012; Gasser and Westhoff, 2012; National Highway Traffic Safety Administration, 2013; SAE International, 2014). Several car manufacturers already offer partly automated driving as a function of their assistance systems. These systems take over both longitudinal and lateral control while the driver is still responsible for monitoring

the automation system and the road (such as adaptive cruise control in combination with active lane keeping). At the next level of highly automated driving the driver does not have to be permanently attentive and is thus allowed to temporarily engage in secondary tasks while driving. However, there are situations the system cannot handle (e.g., when reaching a system boundary due to sensor or actuator limitations, ambiguous environment observations, etc.) and the driver must be able to take over control within a reasonable amount of transition time. Ensuring that the driver is able to intervene in time poses one of the major challenges to highly automated driving. Previous research has demonstrated that automation alone can take the user out of the loop, resulting in deteriorated reactions in cases of system failures or boundaries (Brookhuis et al., 2001; Endsley and Kaber, 1999; Endsley and Kiris, 1995; Kaber and Endsley, 2004; Neubauer et al., 2012; Wiener and Curry, 1980). It can be assumed that for a distracted driver this so-called out-of-the-loop performance problem (Endsley and Kiris, 1995) is compounded

\* Corresponding author. Tel.: +49 7031 4389875.

E-mail addresses: [kathrin.zeeb@daimler.com](mailto:kathrin.zeeb@daimler.com) (K. Zeeb), [axel.buchner@hhu.de](mailto:axel.buchner@hhu.de) (A. Buchner), [michael.schrauf@daimler.com](mailto:michael.schrauf@daimler.com) (M. Schrauf).

(Merat et al., 2012). The question of how long it takes a distracted driver to take over control of the vehicle after automated driving has therefore attracted growing attention within the last years.

The following sections outline the current state of research on take-over times (Section 1.1) as well as on visual distraction while driving and its influence on gaze behavior (Section 1.2). Finally, the purpose of the present study is presented (Section 1.3).

### 1.1. Take-over time after highly-automated driving

Damböck et al. (2012) conducted a driving simulator study in which participants performed a highly automated driving task on the highway. Participants drove while performing a visual secondary task that was cognitively and manually demanding. The authors examined different times from take-over request until the system boundary was reached. It was found that from take-over times of 6–8 s there were no differences in the driving behavior in a take-over situation when compared to non-automated driving. Petermann-Stock et al. (2013) found maximum take-over times ranging from 5.7 to 8.8 s. Further studies report mean take-over times between 2.1 and 4.1 s (Giesler and Müller, 2013; Gold and Bengler, 2014; Gold et al., 2013). Gold and Bengler (2014) additionally measured the time to the first gaze at the scenery (0.7 and 0.9 s for a time budget of 5 and 7 s, respectively). They also measured the time until the hands touch the steering wheel (1.5 and 1.8 s for a time budget of 5 and 7 s, respectively).

Several studies report an influence of secondary task demands on take-over time and quality (Merat et al., 2012; Petermann-Stock et al., 2013; Radlmayr et al., 2014). Studies on assisted driving (e.g., with adaptive cruise control) or manual driving revealed a number of additional environment and driver-related factors affecting reaction times while driving. These include driving task demands (Alm and Nilsson, 1994; Jamson and Merat, 2005), driver expectancy (Ruscio et al., 2015), urgency of the reaction (Schweitzer et al., 1995), automation complacency (Ruscio et al., 2015), and age (Broen and Chiang, 1996). Ruscio et al. (2015) even identified the single processing steps that were or were not delayed. The authors divided brake reactions to a warning into the processes of perception, mental processing, and motor execution of actions. They found that the expectation of an event influenced the time needed for perceiving and mentally processing the warning, but not the time for putting the driver's foot on the brake pedal and performing braking pressure.

Hence, there is no such thing as a single, general take-over time. Instead, the take-over time is, within limits, specific for a particular set of situation variables (e.g., traffic density, action alternatives, HMI concepts, secondary task type, level of driver distraction) and driver variables (e.g., age and skill of the driver). While the studies referred to in the previous paragraph provide important initial insights into take-over after automated driving, a closer examination of the basic processes underlying the driver take-over and how these processes are affected by situation and driver variables has not been addressed so far.

### 1.2. Driver distraction

Driver distraction is regarded as one of the major causes for crashes and near-crashes (Klauer et al., 2006; McEvoy et al., 2006). Considerable research has been conducted on distracted driving without automation.

#### 1.2.1. Effects of visual distraction

As most information is perceived visually while driving (Cohen and Hirsig, 1991; Sivak, 1996; Sivak, 1996), visual distraction is often considered the most safety-critical type of distraction. A strong impairment of the detection of critical stimuli or events during visually distracted driving could be observed (Greenberg et al., 2003). Several authors have demonstrated a strong relationship between visual distraction and the likelihood of becoming involved in a collision (e.g. Horrey and Wickens, 2007; Klauer et al., 2006). Furthermore, visual distraction is regarded as one of the main contributing factors to crashes and near-crashes in real-world driving (Dingus et al., 2006). In addition, visually demanding secondary tasks have been shown to lead to an increased variation of lane position and more frequent steering corrections (Engström et al., 2005; Green, 1999; Greenberg et al., 2003; Jamson and Merat, 2005), as well as to a reduction in speed (Engström et al., 2005; Jamson and Merat, 2005). The latter of which is often considered a compensatory effect.

Finally, this strong impairment of driving performance is linked to the driver's gaze behavior during visually distracted driving. A study conducted by Victor (2005) showed that drivers who are visually distracted (e.g. by reading an email or by dialing a telephone number) spent only 29% of their viewing time on the road center, compared to 80% in the case of non-distracted drivers. Besides this general diversion of visual attention away from the roadway, the glances at the road by visually distracted drivers were spatially more concentrated toward road center compared to non-distracted and cognitively distracted drivers.

#### 1.2.2. Gaze behavior as an indicator of driver distraction

Although it is possible, in principle, to shift attention independent of the position of the eye (e.g., Posner et al., 1978), there is clear evidence that eye movements are closely linked to the driver's visual attention (e.g. Crundall and Underwood, 1998; Crundall and Underwood, 1998, 2011; Konstantopoulos et al., 2010; Underwood, 2007). Against the background of automated driving, this is of special interest given that the measures of driver distraction derived from driving performance (Bach et al., 2009) cannot be used when the vehicle is controlled by the system and not the driver. Recent research on manual driving has documented that certain gaze parameters are sensitive enough to measure the level of distractedness. Drivers' glances at a secondary task display increase in duration and frequency with increasing visual task difficulty, while the time spent inspecting the road center decreases (Green, 1999; Peng et al., 2013; Victor et al., 2005). Also, both the maximum off-road glance duration and the number

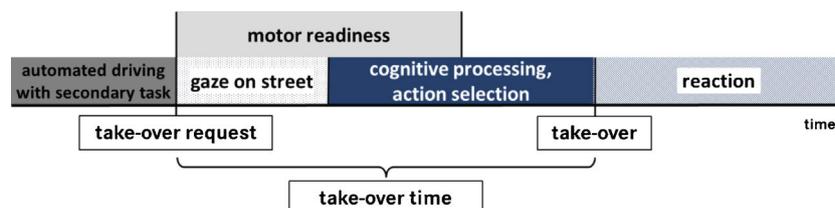


Fig. 1. Model of processes underlying the driver take-over after highly automated driving while doing secondary tasks.

of off-road glances taking longer than two seconds increase with rising task demands (Peng et al., 2013; Victor et al., 2005). Horrey and Wickens (2007) stress the fact that many studies focus on the average rather than the maximum off-road glance duration, although these extreme values are the actual safety-relevant ones. The authors showed that the mean off-road glance duration did not differ significantly as a function of the task complexity, while the amount of extremely long off-road glances increased with task difficulty. Accordingly, Peng et al. (2013) classified drivers as high-risk and low-risk drivers with high-risk drivers showing longer maximum off-road glance durations and less frequent off-road glances. High-risk drivers also displayed a larger percentage of the total time of off-road glances compared to low-risk drivers.

### 1.3. Purpose of the present study

Considerable research has been conducted on the impact of visual distraction on the driver's gaze behavior and much is already known about what can be considered well-adapted gaze behavior during non-automated driving. However, little is known about the effects of visual distraction on gaze behavior during highly automated driving and how this, in turn, affects the driver's behavior in take-over situations. Given that automated systems are becoming more and more important, it is necessary to examine the degree of visual distraction which poses serious safety implications for driver take-over. Fig. 1 outlines theoretical assumptions about the processes underlying the driver take-over.

When a system-initiated take-over request is prompted during highly automated driving, a visually distracted driver will initially redirect his or her gaze from the secondary task to the street. If the performed secondary task includes a manual aspect such as holding something or using some input device, it may also be necessary for the driver to simultaneously return his hands back to the steering wheel and to move his feet toward the pedal systems. Thereby the driver achieves motor readiness (Fig. 1) to take over the driving task. As mentioned in Section 1.1, reaction times are typically less than a second for the first gaze at the scenery, 1.5–1.8 s for the first contact with the steering wheel and about 1.5 s until the foot is on the brake pedal. The main factor influencing these motor processes should be the manual load of the secondary task.

The model shares with threaded cognition theory the general notion that multiple threads or goals can be active at the same time, and as long as there is no overlap in the cognitive, perceptual, or motor resources needed by these threads, there is no multitasking interference (Salvucci and Taatgen, 2008, 2011). This assumption implies that the perceptual and cognitive processing of the take-over situation can be executed parallel to the achievement of motor readiness. Similar to the model of situation awareness (Endsley, 1995) we assume that cognitive processing includes perceiving single elements and updating the current mental model of the situation by integrating relevant elements into a coherent model. Based upon the updated mental model an appropriate action can be selected.

As described in Section 1.1, it can be assumed that there are environment-related and driver-related factors (e.g., the complexity of the situation or the driver's state of distraction) that influence the quality and duration of the driver take-over. Driver distraction in particular was shown to delay take-over time (e.g. Petermann-Stock et al., 2013). As gaze behavior was shown to reflect the driver's level of distractedness (Section 1.2.2), we hypothesize that there is also a relationship between the driver's gaze behavior during highly automated driving and the take-over performance. Research on manual driving shows that experienced drivers have scanning strategies that differ from those of novice drivers, and experienced drivers are better at adapting their strategies to

different driving task demands (Crundall and Underwood, 1998; Konstantopoulos et al., 2010; Underwood, 2007). According to Underwood (2007) a novice driver's scanning pattern reflects an inadequate mental model of the driving situation. In line with these results we assume that gaze behavior during highly automated driving is linked to the driver's situation awareness. Drivers with a well-adapted allocation of visual attention between the driving and the secondary task should make regular glances at the street, thereby allowing them to gain enhanced situation awareness compared to drivers focusing mostly on the secondary task. This should lead to a rapid reorientation and update of the driver's mental model in a sudden take-over situation, allowing an earlier and well adapted take-over reaction. Based on the results by Ruscio et al. (2015), we hypothesize that this has an effect mainly on the perception and cognitive processing of the take-over situation, and no or only little effect on achieving motor readiness.

This study focuses on processes underlying the driver take-over after highly automated driving and examines the relationship between the driver's gaze behavior and the take-over. Based on this, assumptions made within our model of driver take-over can be tested.

We address the following questions: (1) How do drivers allocate their visual attention during highly automated driving while engaging in a secondary task? (2) Which gaze parameters can be used to assess how effectively the driver monitors the roadway? (3) How does gaze behavior influence the quality and duration of the driver take-over on the whole and how is it related to the corresponding underlying processes?

## 2. Methods

### 2.1. Participants

The data reported here represent a subset of the data collected within an extended experimental design with 247 participants in total (Cardenas, 2013). 107 participants took part in the condition that is reported here. Data from 18 participants had to be excluded due to technical problems, incomplete data recordings or motion sickness. As a result, data from 89 participants (54 male, 35 female) with a mean age of 42 years (range 20–72,  $SD = 13$ ) were analyzed. The participants were recruited using a Daimler AG database of volunteers. Participants were required to hold a valid driver's license (which they held for 24 years,  $SD = 13$ , on average), to have normal or corrected-to-normal vision. Of all participants, 94% had experienced cruise control at least once (55% used it regularly, 29% occasionally and 10% once). Data were collected anonymously. Informed consent was obtained after the task had been explained. Participants were free to terminate participation in the experiment at any time without any type of penalty. Participants received 50 € for their participation. All experimental procedures were conducted in accordance with the ethic guidelines of the Declaration of Helsinki.

### 2.2. Driving simulator

The study was conducted in the Daimler AG dynamic driving simulator in Sindelfingen, Germany. The moving-based simulator dome has a hexapod platform which is mounted on a single 12 m axis for linear motion. Inside the dome a real car cabin (here an E-Class sedan, W212) and a photorealistic 360° projection served as testing environment (Clark, 2012). Inside the car cabin, two cameras pointed at the driver to control driver activity and to record their gaze behavior. Another camera was located in the foot well to record the driver's acceleration and braking behavior.

### 2.3. Highly automated driving system

The highly automated driving system controlling the longitudinal and the lateral guidance on the highway was a combination of adaptive cruise control and active lane keeping. The system was activated by the driver with a lever on the left side of the steering wheel that usually controls the adaptive cruise control. When activated, the system adjusted the car's velocity to 130 km/h (81 mph) or, in case of a slower leading vehicle, to an experimentally manipulated distance that corresponded to a time gap of 2.5, 3.0 or 3.5 s. The system did not conduct lane changing or overtaking manoeuvres. The system status displays were implemented in the central display of the head unit located at the center console. A green lamp indicated that the system had been activated. When the system recognized a critical situation that it could not handle, an acoustic warning prompted the driver to take over the driving task and a red steering wheel icon appeared in the head unit display (Fig. 2, left).

### 2.4. Test procedure

Before the test drive, participants filled out a socio-demographic questionnaire and received instructions containing information about the following drive and the highly automated driving system. They were informed that the system would control the vehicle laterally and longitudinally at a set maximum speed and automatically keep the distance to the vehicle ahead. Furthermore, they received information that there could be situations the system cannot handle and that the car would prompt a visual and auditory take-over request after which the driver would have only a limited amount of time before the system would be deactivated automatically. The participants did not receive further information about the take-over situations. It was explained that there would be secondary tasks the participants should be executing while the automated system was activated. When seated in the car, the participants finally received general information on the handling of the car, how to activate and deactivate the system and where the system status was to be displayed.

The simulation started with an 11 km training drive on a two-lane highway where the participants first drove the car without the automated driving system to get used to the simulator and the vehicle. After that, the participants were instructed to activate the system. Participants were instructed to stay in the right lane. After further 2 km the participant's car approached a black SUV that also drove in the right lane at 120 km/h (75 mph). The automated driving system autonomously adjusted the car's velocity to the speed of the SUV running ahead so that the driver followed the SUV with a constant time gap of 2.5, 3.0 or 3.5 s, depending on the experimental condition. The time gap is defined as the number of seconds it takes for the participant's car to pass a particular position that had been passed by the SUV. The drivers were

instructed to remain behind the SUV during the entire ride and were then allowed to start working on the secondary tasks.

At kilometers 25.9 and 40.6 (corresponding to about 11 and 19 min of highly automated driving, respectively) one of two take-over situations took place. In both situations the ego-lane was blocked because of roadwork or a road construction sign. As soon as the SUV changed lanes to pass the obstacle the system was able to detect it and requested the driver to take over the control of the vehicle with a time budget of 12 s before reaching the obstacle. These situations were arranged in a non-time critical way so that the drivers all had enough time to react. The purpose was to get the participants used to the automation system, its system boundaries and the take-over request and they were not included in further statistical analyses. At kilometer 55.4 (after about 26 min of highly automated driving and about 7 min after the previous take-over situation) a third take-over situation took place. This time the ego-lane was blocked by a broken vehicle and the SUV changed lanes close to this obstacle (i.e. at a distance of 50 m, which corresponds to a time gap of 1.5 s until the SUV would have collided with the obstacle). The take-over request was prompted with a time gap of 2.5, 3.0 or 3.5 s before reaching the obstacle, depending on the experimental condition. The system simultaneously started a preemptive braking with a decelerating rate of  $2.5 \text{ m/s}^2$ . This resulted in 4.9, 5.7 or 6.6 s before the participant's car would have collided with the obstacle had the driver not intervened.

Shortly before the critical situation a convoy of several vehicles passed in the left lane, thereby blocking that lane and making a steering manoeuvre to avoid the obstacle impossible. The take-over is depicted in Fig. 3. It is important to note that this take-over situation was designed as an emergency situation that could not be handled by all drivers. Furthermore, all collision avoidance systems of the vehicle were deactivated. The aim was to examine a critical scenario that was difficult to handle without the support of driver assistance systems. The whole test drive was 55.8 km long and took about 28 min.

### 2.5. Secondary task

The tasks "texting" and "internet search" (described below) served as model tasks for typical visual distraction scenarios and were displayed in the central display. Interventions were performed using a rotating/push button, which is assumed to induce low manual demand (Fig. 2, right). Both, display and operating of the multimedia system are standard in the 2014 Mercedes E-Class model. The tasks were integrated into a custom-designed multimedia system menu. They consisted either of simple text entries (e.g., completing the missing word of a saying or copying a given sentence) or internet searches (e.g., going to a mobile site or using a search engine). As soon as the driver finished one task with a click on the "OK" button the next task automatically popped up. The tasks were in the same order for all participants

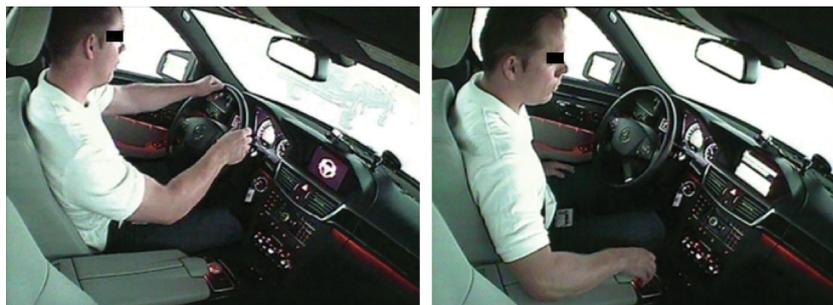


Fig. 2. Take-over request in the head unit (left). Driver working on secondary task in the head unit with rotating/push button (right).



Fig. 3. Critical take-over situation due to a broken vehicle on the ego-lane.

and there was no time limit for finishing the tasks to ensure individual processing times. However, a new block of secondary tasks of comparable difficulty was started for all participants after the second take-over situation to ensure similar tasks for the third take-over manoeuvre. The difficulty of the tasks was not tested beforehand. The task type is not included in further analyses.

### 2.6. Recording of eye movements

Eye movements were collected via video labeling of the two interior cameras. The cameras were set up with different angles so that a detection of the viewing direction was always possible. The following areas of interest (AOI) were differentiated: windshield (roadway in front of the driver), central display (secondary task), left and right exterior mirror, rearview mirror and instrument cluster. Data was recorded only during the three take-over situations from 1950 m before the obstacle until the obstacle was passed. That corresponded to one minute before the take-over request was prompted and—depending on the driver's reaction and the speed of the vehicle—about 15 s until the obstacle was passed. The video was recorded with a sampling rate of 25 Hz. The analyses of the eye movements included only the minute before the take-over request was prompted. Unless noted otherwise the analyses of the eye movements refer to the last minute before the third, critical take-over situation. The labeling was done framewise with the video annotation tool ANVIL version 5.1.7 (Kipp, 2013).

## 3. Results

### 3.1. Gaze behavior during highly automated driving and engaging in a secondary task

All eye movement analyses were based on gazes. According to Crundall and Underwood (2011), a gaze consists of one or multiple fixations within one AOI. Gaze duration is therefore defined as the time the eye dwells continuously within an AOI.

Figs. 4 and 5 depict the gaze behavior during highly automated driving. Fig. 4 shows the mean number and corresponding duration of glances at different AOIs during 1 min of highly automated driving. It should be noted that the mean duration of central display glances shows a right-skewed distribution and the mean is strongly biased upward (median = 7.2 s). Fig. 5 presents the average total amount of glances at different AOIs within 1 min of highly automated driving.

### 3.2. Driver classification based on gaze behavior

In order to find appropriate criteria for adequate gaze behavior it is necessary to consider not only measures of the central tendency (such as means or medians) but also extreme values containing valuable information about the distribution of the data and which may be better indicators of high-risk behavior. The maximum duration of one single gaze off the roadway is therefore plotted against the number of glances at the central display for each driver during 1 min of highly automated driving (logarithmic regression,  $F(1, 87) = 447.54$ ,  $p \leq .01$ ,  $R^2 = .84$ ).

Currently, objective criteria for an a priori classification of gaze behavior in automated driving do not exist. We therefore conducted an empirical classification using a  $k$ -means clustering algorithm. Using this clustering algorithm, the drivers were classified into three groups that were labeled high, medium and low-risk drivers. The high-risk driver group showed less frequent glances at the central display, but longer maximum eyes-off-road time than medium and low-risk drivers (Fig. 6,  $n_{\text{high}} = 20$ ,  $n_{\text{medium}} = 36$ ,  $n_{\text{low}} = 33$ ).

Analyses of additional parameters of gaze behavior showed more significant differences among the three groups of drivers (Table 1), and pairwise comparisons (Tamhane's  $T_2$ ) revealed that these differences were all statistically significant ( $p \leq .01$  for all comparisons). The high-risk driver group took significantly fewer glances through the windshield and spent a smaller total percentage of time looking at the roadway in front of the car

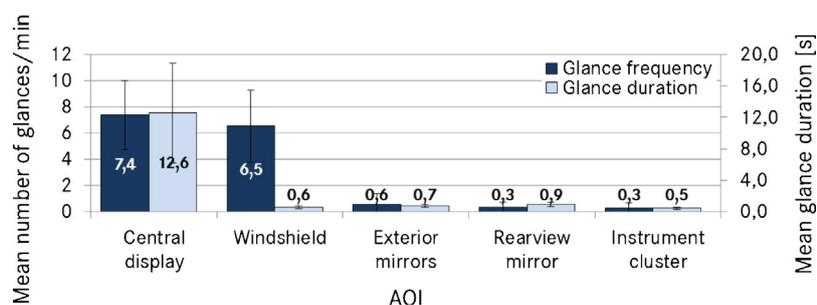


Fig. 4. Mean glance frequency and glance duration with standard deviation as error bars during 1 min of highly automated driving while engaging in a visual secondary task. Glance frequency for  $n = 89$  drivers for all AOIs. Glance duration for the number of recorded glances for each AOI:  $n_{\text{centraldisplay}} = 89$ ,  $n_{\text{windshield}} = 82$ ,  $n_{\text{exteriormirrors}} = 18$ ,  $n_{\text{rearviewmirror}} = 18$ ,  $n_{\text{instrumentcluster}} = 17$ .

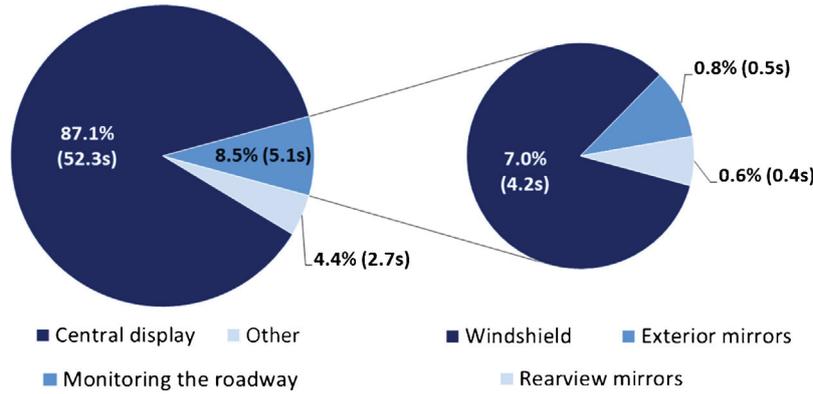


Fig. 5. Mean total glance duration (% and s) for different AOIs for 1 min of highly automated driving (n = 89).

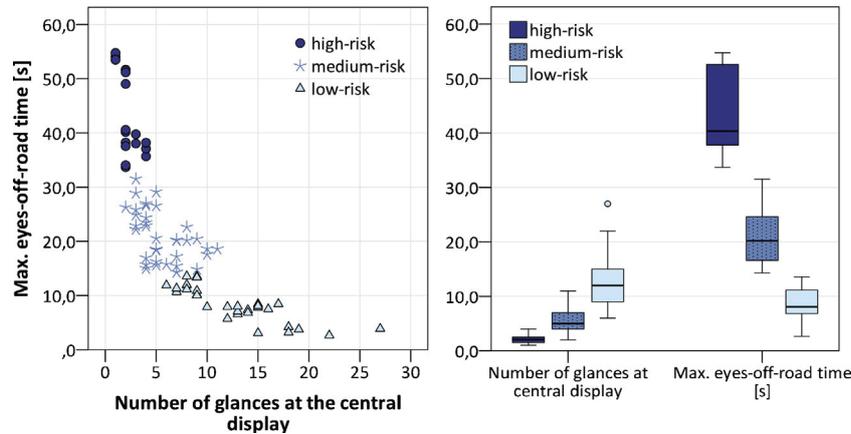


Fig. 6. Maximum eyes-off-road time depending on the number of glances at the central display with resulting driver classification (left). Boxplots for number of glances at the central display and maximum eyes-off-road time for each driver group (right).

Table 1

Parameters of windshield and central display glances for high, medium and low-risk driver groups (means with standard deviations in brackets) and statistical results of a one-way ANOVA with driver group as between-subject factor. All pairwise comparisons based on Tamhane's T2 revealed significant differences among all groups ( $p \leq .01$  for all comparisons).

	Glances at windshield			Glances at central display		
	Number	Total % of 1 min drive	Number	Total % of 1 min drive	Duration (s)	Max. eyes-off-road time (s)
High-risk	1.10 (1.00)	1.17 (1.63)	2.15 (0.99)	97.45 (2.48)	30.39 (14.97)	44.35 (7.99)
Medium-risk	4.72 (2.47)	4.73 (2.71)	5.56 (2.34)	90.04 (5.52)	10.55 (4.90)	20.83 (4.79)
Low-risk	11.79 (4.96)	13.11 (7.59)	12.48 (4.84)	77.57 (11.19)	3.94 (1.75)	8.59 (3.29)
F(2, 86)	68.38	41.96	(68.41) <sup>a</sup>	45.17	74.10	(290.64) <sup>a</sup>
p	$\leq .01$	$\leq .01$	( $\leq .01$ ) <sup>a</sup>	$\leq .01$	$\leq .01$	( $\leq .01$ ) <sup>a</sup>

<sup>a</sup> As the factor groups were classified based on these variables, the given statistics cannot be used to assess differences between the groups.

Table 2

Demographic variables for high, medium and low-risk driver groups. Experience with driver assistance systems was measured on a 5-point Likert scale (1 – no experience, 5 – regular use). For data on ratio or ordinal scale means (standard deviations in brackets) and statistical results of a one-way ANOVA with driver group as between-subject factor are given. For categorical data percentages and results of a  $\chi^2$  test are given.

	Age (years)	Gender (% female/% male)	Mileage (1000 km/a)	Experience with	
				adaptive cruise control	lane keeping system
High-risk	38.65 (12.68)	50/50	18.3 (12.16)	2.75 (1.12)	1.45 (0.69)
Medium-risk	40.39 (12.81)	27.8/72.2	24.51 (13.59)	3.06 (1.17)	1.69 (0.62)
Low-risk	45.30 (12.41)	45.5/54.5	23.56 (16.98)	3.21 (1.17)	1.67 (0.69)
F(2, 86)	2.12	3.49 <sup>a</sup>	1.23	1.00	0.96
p	$\geq .1$	$\geq .1$	$\geq .05$	$\geq .1$	$\geq .1$

<sup>a</sup> A  $\chi^2$  test was conducted for categorical data.

than the medium and the low-risk driver group. They also showed a higher total percentage of time spent looking at the central display and longer mean single glances at the central display than the other driver groups.

The driver groups did not differ significantly in age, gender ratio, mileage per year or experience with different driver assistance systems such as cruise control, adaptive cruise control, lane departure warning, lane keeping assist (Table 2).

### 3.3. Driver take-over

In the present scenario, braking was the only take-over reaction to prevent a collision. The take-over time was defined as the time between the take-over request and the point when the standardized brake pedal travel was larger than 10%. First hand-contact with steering wheel was considered a measure of motor readiness. This detection was based on the steering wheel dynamics. The system used an absolute steering wheel angle velocity larger than  $0.075^\circ/s$  and absolute steering wheel angle acceleration larger than  $5^\circ/s^2$  as the criteria for hands-on recognition. A number of drivers had to be excluded from these analyses: One driver had his hands on the steering wheel before the take-over request, 27 drivers looked at the road before the take-over request and 9 drivers did not brake.

The remaining drivers needed 1.14 s ( $SD=0.45$  s) on average for their first contact with the steering wheel after the take-over request. A one-way ANOVA revealed no significant differences between low, medium and high-risk drivers ( $F(2, 85)=0.20$ ,  $p=.82$ ). The first gaze at the road was on average after 0.69 s ( $SD=0.20$  s). There were again no significant differences among driver groups ( $F(2, 59)=2.59$ ,  $p=.084$ ). Average braking time differed among the driver groups ( $F(2, 77)=7.18$ ,  $p\leq.01$ ). High-risk drivers ( $M=2.31$  s,  $SD=0.67$  s) started braking later than both medium ( $M=1.86$  s,  $SD=0.67$  s,  $p=.038$ ) and low-risk drivers ( $M=1.63$  s,  $SD=0.50$  s,  $p\leq.01$ ). The group difference just missed the conventional criterion of statistical significance for the percentage of collisions variable ( $\chi^2(1)=5.67$ ,  $p=.059$ , Cramer's  $V=.253$ ). High-risk drivers collided with the obstacle significantly more often than low-risk drivers (45.0% vs. 15.2% collisions,  $p\leq.05$ ). Two drivers collided with the obstacle on the ego-lane, the remaining collisions occurred with the surrounding vehicles on the left lane. Braking reaction time and percentage of collisions are presented in Fig. 7.

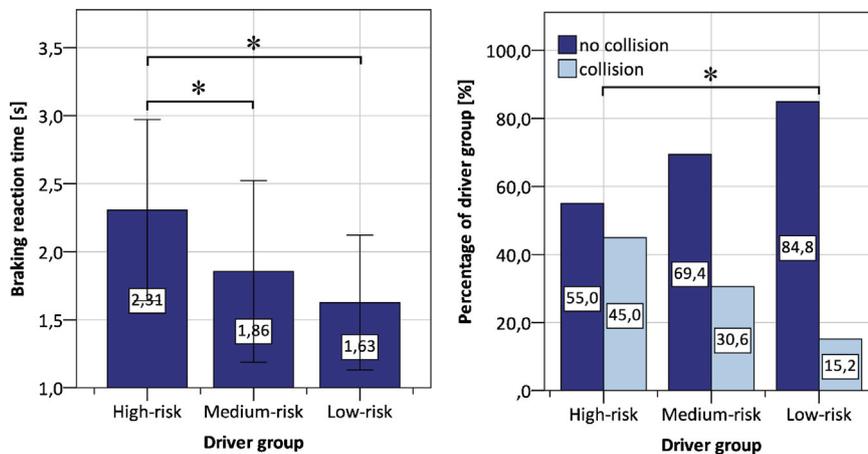


Fig. 7. Mean reaction time with standard deviation as error bars (left) and percentage of collided drivers (right) for each driver group.  $n_{high}=20$ ,  $n_{medium}=36$ ,  $n_{low}=33$ . \* $p\leq.05$ , \*\* $p\leq.01$ .

### 3.4. Stability of gaze behavior

In order to evaluate the stability of the drivers' gaze behavior, the same  $k$ -means classification was applied to 1 min of data after 11 ( $t_1$ ) and 19 min ( $t_2$ ) of highly automated driving in addition to the above mentioned driver classification after 26 min ( $t_3$ ). For the resulting plots, see Fig. 8.

As shown in Table 3, there are moderate relationships between the categories the drivers were assigned to at times  $t_1$  and  $t_2$  as well as at  $t_1$  and  $t_3$  and a strong relationship between the classifications at times  $t_2$  and  $t_3$ . The increase in the relationship from  $r=.50$  between  $t_1$  and  $t_2$  to  $r=.70$  between  $t_2$  and  $t_3$  is statistically significant ( $t(82)=2.52$ ,  $p=.01$ ). 59% of the drivers were assigned the same group at  $t_1$  and  $t_2$ , compared to 67% at  $t_2$  and  $t_3$ .

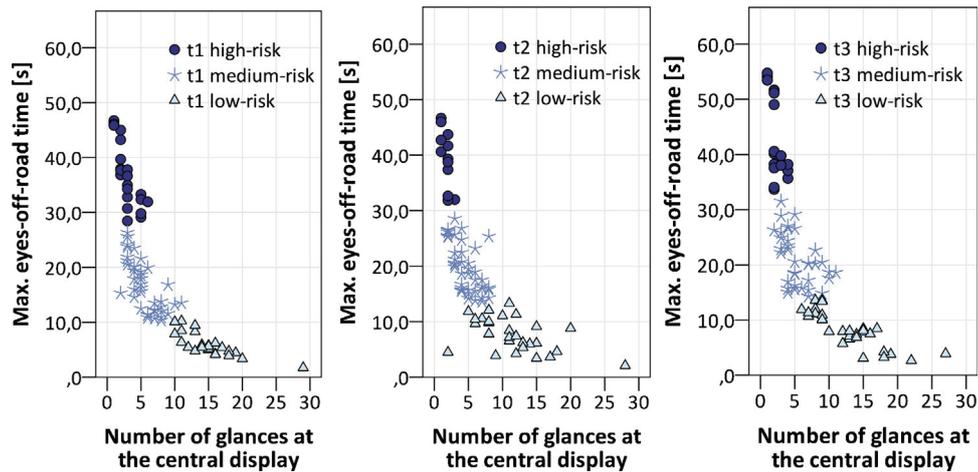
## 4. Discussion

The main intent of this paper was to examine the process of the driver take-over of the vehicle in an emergency situation after highly automated driving. Particular attention is paid to the driver's gaze behavior during automated driving (discussed in Section 4.1) and which gaze parameters seem suitable for a driver classification (Section 4.2). Finally, the influence of this classification on the process of driver take-over (Section 4.3) and a basic take-over model are discussed (Section 4.4).

### 4.1. Allocation of visual attention between driving and secondary task

During automated driving, drivers focused mainly on the secondary tasks while there was little monitoring of the roadway and the system. However, it was not only the total glance duration that revealed a strong focus on the secondary task. While drivers made about as many glances at the central display as at the windshield, the single glances at the central display were on average remarkably longer than glances at the street (12.6 vs. 0.6 s). Comparing these values with gaze behavior during manual driving might help evaluating these findings.

In a field study conducted by Waldthausen et al. (2013) drivers had to enter addresses in the central display during manual driving on the highway. Compared to the results of the present study, the authors found a much higher number of glances per minute both at the central display and the street (4.2 times more glances at the secondary task and 3.3 times more glances at the street for manual



**Fig. 8.** Driver classification based on number of glances at the central display and maximum eyes-off-road-time during 1 min of highly automated driving after 11 (*t*<sub>1</sub>, left), 19 (*t*<sub>2</sub>, middle) and 26 min (*t*<sub>3</sub>, right) of driving.  $n_{t1high} = 23$ ,  $n_{t1medium} = 40$ ,  $n_{t1low} = 24$ ,  $n_{t2high} = 13$ ,  $n_{t2medium} = 43$ ,  $n_{t2low} = 31$ ,  $n_{t3high} = 20$ ,  $n_{t3medium} = 36$ ,  $n_{t3low} = 33$ .

compared to automated driving). However, a more interesting comparison is the single glance duration on these areas. Glances at the road had a comparable duration (on average 0.8 s during manual driving vs. 0.6 s during automated driving). Glances at the secondary task, on the other hand, were more than 11 times longer during automated driving compared to manual driving (12.6 vs. 1.1 s). These comparisons suggest that performing secondary tasks during automated driving leads to strongly extended glances at the secondary task as compared to manual distracted driving. Glance durations at the street, however, seem to be mainly unaffected. A possible explanation for this effect could be that the glances at the road have to be of a certain duration in order to adequately perceive the driving environment and to update the mental model of the driving situation. The reduced glance frequency during automated driving, however, might simply be a consequence of the extended glance durations at the secondary task.

Although it could be expected that drivers would have comparably long single glances at the secondary task during automated driving, these findings are still contrary to our expectations. We had expected to find a maximum duration, where drivers would be unwilling to go without information about the driving environment. However, there did not seem to be a “natural” threshold to how much visual attention drivers pay to the roadway during the automated drive. Previous studies of non-automated driving had shown that drivers are unwilling to go without information of the roadway for longer than 2 s (known as the “2-second rule”, Green, 1999; Rockwell, 1972). With the increasing importance of automated systems the question arises as to what separates acceptable from high risk visual distraction.

Some methodological limitations of the present study must be considered. Here, the drivers were novices in dealing with the

highly automated driving system. Also, the study was conducted in a driving simulator with no real risk of accidents, and the drivers were explicitly encouraged to engage in secondary tasks. These factors may have led to an unusual priority being given to the visual secondary task. Furthermore, the gaze data covered only one minute of continuous highly automated driving. A longer time window might have been more revealing.

#### 4.2. Driver classification based on gaze behavior

In order to assess the driver’s monitoring behavior, an attempt was made to identify gaze parameters that reflect the allocation of visual attention to the driving and the secondary task. By relating the number of glances at the secondary task to the maximum duration of off-road glances, different strategies for monitoring the roadway became apparent. While some drivers preferred many, but comparably short, off-road glances others preferred fewer, but very long glances at the secondary task. It seems reasonable to assume that the former reflects a better adapted and less risky allocation of visual attention between the driving and secondary task. The drivers were thus classified on the basis of these variables into high, medium and low-risk drivers. High-risk drivers showed fewer and a smaller total percentage of glances at the street and conversely longer glances at the secondary task and a longer maximum off-road glance duration. Studies on non-automated driving revealed similar effects of visual distraction on gaze parameters (e.g. Green, 1999; Victor et al., 2005). This indicates that fundamental processes during distracted driving and the categorization approach of Peng et al. (2013) are apparently applicable to highly automated driving. The number and the maximum duration of off-road glances seem to be suitable gaze parameters to assess and categorize the driver’s monitoring behavior in highly automated driving situations.

The driver classification was shown to be moderately stable throughout the 26 min drive. In fact, the relationship between classifications even increased across this time period. The latter aspect of the data may reflect the development of a “gaze strategy” of the driver in the driving situation that was initially novel for all drivers (see above). Previous studies have found evidence for situational factors influencing the gaze behavior while driving such as the difficulty of the secondary task (Green, 1999; Victor et al., 2005) or the complexity of the driving situation (Chapman and Underwood, 1998; Crundall and Underwood, 1998; Victor, 2005). These factors might also influence a driver classification based on gaze behavior. However, the stability of the driver

**Table 3**

Correlation (Spearman’s  $\rho$  for ordinal data) between the driver classification groups at times *t*<sub>1</sub>, *t*<sub>2</sub> and *t*<sub>3</sub> followed by the number of drivers that are classified into the same group, more risky or less risky. \* $p < .05$ , \*\* $p < .01$ .

		<i>t</i> <sub>2</sub>	<i>t</i> <sub>3</sub>
Spearman’s $\rho$	<i>t</i> <sub>1</sub>	$r = .50^{**}$	$r = .49^{**}$
	<i>t</i> <sub>2</sub>	–	$r = .70^{**}$
Classified same group <i>n</i> (%)	<i>t</i> <sub>1</sub>	51 (59.30%)	47 (54.02%)
	<i>t</i> <sub>2</sub>	–	58 (66.67%)
Classified more risky <i>n</i> (%)	<i>t</i> <sub>1</sub>	11 (12.79%)	14 (16.09%)
	<i>t</i> <sub>2</sub>	–	17 (19.54%)
Classified less risky <i>n</i> (%)	<i>t</i> <sub>1</sub>	24 (27.91%)	26 (29.89%)
	<i>t</i> <sub>2</sub>	–	12 (13.79%)

classification reported here suggests that these situational factors do not determine the drivers' gaze behavior exclusively. Hence, there seems to be a personal and to some degree stable factor. This seems interesting because a driver classification is useful only to the degree to which it is stable over time. As none of the demographic characteristics like age, mileage or experience with driver assistance systems varied among driver groups, the question arises, what those personal factors are that influence gaze behavior. For instance, driving experience was shown in several studies to have an effect on gaze behavior (Crundall and Underwood, 1998; Konstantopoulos et al., 2010; Underwood et al., 2003), whereas groups showing differences in gaze behavior did not differ in driving experience in the present study. The reason for this might be simple: None of the drivers had any experience with highly automated driving systems.

More interesting than driving experience might be an assessment of the driver's personality type and driving style. Such measures were not available in the present study, but this aspect should be addressed in future research. Also, given that the simulated drive took only 26 min with data sampling at 3 occasions the data do not allow deriving conclusions about possible long-term effects. This, too, must be done in future studies.

### 4.3. Influence of gaze behavior on driver take-over

#### 4.3.1. Take-over action

Consistent with the original hypothesis, it has been found that drivers with maladaptive monitoring behavior reacted more slowly and more often incorrectly in sudden emergency take-over situations. The data showed that high-risk drivers started with a braking intervention later than both medium and low-risk drivers. They also showed more collisions with the surrounding traffic than low-risk drivers. These findings are in good agreement with studies on non-automated driving that found a strong correlation between the off-road glance duration and the crash risk (Horrey and Wickens, 2007; Klauer et al., 2006). These results thus indicate that gaze behavior during automated driving cannot only be used as an indicator of visual distraction, but also as a predictor for the readiness to take over the vehicle. Given that even a distracted driver must be able to take over the vehicle after a certain time in an automated driving situation, the possibility of assessing the driver's readiness to take over can be of extreme value. However, it must be assumed that there are many possible factors influencing the take-over time and performance (e.g. fatigue, experience, personality, the complexity of the situation). Thus far, we do not know the magnitude of influence of these factors and possible interactions between them.

It should be noted that in the present study the overall the number of collisions was higher and take-over times much shorter compared to studies by Damböck et al. (2012), Petermann-Stock et al. (2013) and Gold et al. (2013). This is most plausibly due to the fact that the take-over situation in the present study was intentionally designed as a difficult emergency situation that required very fast reactions and deliberately provoked collisions. It should not be seen as an exact model of everyday take-over situations. Moreover, it should be noted that the drivers had initially experienced two uncritical take-over situations with a sufficient time budget before they experienced this critical situation. Therefore, it is possible that practice effects lead to decreased reaction times. Further, the fact that the drivers were used to a sufficient time budget in the first two take-over situations and suddenly found themselves in a time critical situation might have interfered with their mental model of take-over situations, thereby causing more accidents.

#### 4.3.2. Motor readiness

It was assumed that the early motor processes of driver take-over (i.e., hand and foot movements) are mostly reflexive following the acoustic warning signal. These processes thus should not be influenced by the gaze behavior. In line with this assumption, there was no relation between the driver group and the time needed for the first contact with the steering wheel after the take-over request. The same was true for the first gaze at the roadway after the take-over request. Thus, there seems to be no influence of visual driver distraction on the time at which the driver establishes motor readiness to take over the vehicle. However, it can be assumed that secondary tasks involving manual load (e.g. involving handheld devices like mobile phones or tablets) will delay the motor readiness of the driver. This was not subject of the current study and should be addressed in future research.

Given that there was a clear effect of driver distraction on the total take-over time, it can be assumed that driver distraction mainly affects the attentional shift and the visual and cognitive processing of the situation. These results provide first insights into how the different processes of a driver take-over are influenced by the driver's mental state. Based on that, a basic model of the driver take-over can be specified.

### 4.4. Take-over model

The take-over model introduced in this article seems compatible with the data reported here. After a take-over request, visually distracted drivers initially avert their gaze from the secondary task to the roadway and simultaneously establish motor readiness to intervene in the vehicle guidance. This process is mostly reflexive and is not, or only marginally, influenced by the driver's level of visual distractedness. The visual and cognitive processing of the situation, however, seems to be affected by the driver's state. It is assumed that one of the main contributing factors for this is the adequacy of the driver's mental model of the surrounding traffic situation. Drivers who distribute their visual attention appropriately between the driving and the secondary task and regularly monitor the roadway should be able to acquire and maintain high situation awareness. This allows rapid reorientation and quick reactions in an unexpected take-over situation. In contrast, a driver who is more focused on the secondary task will have a less complete and presumably less adequate mental model of the driving situation and thus will take more—sometimes too much—time to update the model before reactions can be generated.

Obviously, a single data set such as the one presented here cannot provide a complete test of the take-over model. More validations by independent data sets are clearly needed. However, even at this stage the basic model assumptions seem to be in a reasonable agreement with the data. It seems sensible to expect that a model-based approach to the processes involved in the take-over process will help solving practical problems such as the definition of an appropriate take-over time and the design of a suitable take-over request so that a safe driver take-over is likely.

## 5. Conclusions

The data presented here offer new insights into the driver's gaze behavior during highly automated driving and they fit well with a basic model of the driver take-over process in a take-over situation. Previous findings showing that the gaze behavior reflects the driver's level of visual distractedness were replicated. Moreover, it was shown that specific gaze parameters are suitable to assess the adequacy of the driver's monitoring strategy.

On the basis of these findings further research is needed on what is an appropriate strategy of allocating of visual attention during highly automated driving. At this stage, the data presented

here can only be interpreted within the specific experimental setting in which it was collected. For instance, it is not currently known whether the fact that the study was conducted in a driving simulator affected the data (e.g., this may or may not have inflated the degree to which the drivers trusted the automated driving system). Also, for a more complete picture of the dynamics of take-over behavior in highly automated driving situations it will be necessary to systematically manipulate variables such as the complexity of the driving environment, the difficulty of the secondary task, or the system reliability. Furthermore, driver related factors like demographic variables, experience, or driving style should be taken into account. At this stage, however, it seems clear that cognitive and not motor processes determine take-over performance, and this insight is expected to have design consequences for real-world automated driving systems.

## References

- Alm, H., Nilsson, L., 1994. Changes in driver behaviour as a function of handsfree mobile phones – a simulator study. *Accid. Anal. Prev.* 26 (4), 441–451.
- Bach, K.M., Jaeger, M.G., Skov, M.B., Thomassen, N.G., 2009. Interacting with in-vehicle systems: understanding, measuring, and evaluating attention. In: British Computer Society (Ed.), *Proceedings of the 23rd British HCI Group Annual Conference on People and Computers: Celebrating People and Technology*, Swinton, UK, pp. 453–462. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1671011.1671070>.
- Brookhuis, K.A., de Waard, D., Janssen, W., 2001. Behavioural impacts of advanced driver assistance systems – an overview. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* 1 (3), 245–253.
- Broen, N., Chiang, D., 1996. Braking response times for 100 drivers in the avoidance of an unexpected obstacle as measured in a driving simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 40 (18), 900–904.
- Cardenas, H., 2013. Take-over time after autonomous driving. Unpublished Master's Thesis. University of Esslingen, Esslingen, Germany.
- Chapman, P., Underwood, G., 1998. Visual search of driving situations: danger and expertise. *Perception* 27, 951–964.
- Clark, J., 2012. Mercedes-Benz driving simulator. Retrieved (05-05-14.) <http://www.emercedesbenz.com/autos/mercedes-benz/corporate-news/mercedes-benz-driving-simulator/>.
- Crundall, D., Underwood, G., 1998. Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics* 41 (4), 448–458.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., Bengler, K., 2012. *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*. 5. Tagung Fahrerassistenz, Munich, Germany.
- Dingus, T., Klauer, S., Neale, V., Petersen, A., Lee, S.E., Sudweeks, J., Perez, M.A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z.R., Jermeland, J., Knippling, R.R., 2006. The 100-car Naturalistic Driving study, Phase II – Results of the 100-car Field Experiment (No. HS-810 593). National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Endsley, M.R., 1995. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Hum. Factors* 37 (1), 32–64.
- Endsley, M., Kaber, D., 1999. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics* 42 (3), 462–492.
- Endsley, M., Kiris, E., 1995. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Hum. Factors* 37 (2), 381–394.
- Engström, J.A., Johansson, E., Östlund, J., 2005. Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 8 (2), 97–120.
- Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, R., Schwarz, J., Vogt, W., 2012. *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fahrzeugtechnik, vol. 83. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach.
- Gasser, T.M., Westhoff, D., 2012. *BAST-study: definitions of automation and legal issues in Germany*. Presentation at the TRB Workshop on Road Vehicle Automation, Irvine, CA.
- Giesler, B., Müller, T., 2013. Opportunities and challenges on the route to piloted driving. Presentation at the 4th International Munich Chassis Symposium, Munich, Germany.
- Gold, C., Damböck, D., Bengler, K., Lorenz, L., 2013. Partially automated driving as a fallback level of high automation. 5. Tagung Fahrerassistenz, Munich, Germany.
- Gold, C., Bengler, K., 2014. Taking over control from highly automated vehicles. *Adv. Hum. Aspects Transp.*: Part II 8 (64), 64–69.
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., Kochhar, D., Kozak, K., Blommer, M., 2003. Evaluation of driver distraction using an event detection paradigm. *J. Transp. Res. Board* 1843 (1), 1–9.
- Green, P., 1999. *Visual and Task Demands of Driver Information Systems* (Technical Report UMTRI-98-16). The University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI.
- Horrey, W., Wickens, C., 2007. In-vehicle glance duration: distributions, tails, and model of crash risk. *Transp. Res. Rec.* 2018 (1), 22–28.
- Jamson, A., Merat, N., 2005. Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 8 (2), 79–96.
- Kaber, D., Endsley, M., 2004. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 5 (2), 113–153.
- Kipp, M., 2013. Anvil 5.1.7. The video annotation research tool. Retrieved (10-04-13.). <http://www.anvil-software.org/>
- Klauer, S., Dingus, T., Neale, V., Sudweeks, J., Ramsey, D., 2006. The impact of driver inattention on near-crash/crash risk. An Analysis Using the 100-car Naturalistic Driving Study Data (No. HS-810 594). National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Konstantopoulos, P., Chapman, P., Crundall, D., 2010. Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. Using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving. *Accid. Anal. Prev.* 42 (3), 827–834.
- McEvoy, S., Stevenson, M., Woodward, M., 2006. The impact of driver distraction on road safety: results from a representative survey in two Australian states. *Inj. Prev.* 12 (4), 242–247.
- Merat, N., Jamson, A., Lai, F., Carsten, O., 2012. Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Hum. Factors* 54 (5), 762–771.
- National Highway Traffic Safety Administration, 2013. *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Neubauer, C., Matthews, G., Langheim, L., Saxby, D., 2012. Fatigue and voluntary utilization of automation in simulated driving. *Hum. Factors* 54 (5), 734–746.
- Peng, Y., Boyle, L.N., Ghazizadeh, M., Lee, J.D., 2013. Factors affecting glance behavior when interacting with in-vehicle devices: Implications from a simulator study. *Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, Bolton Landing, NY: University of Iowa, pp. 474–480. <http://drivingassessment.uiowa.edu/2013/proceedings>.
- 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 Stauffahrt*. 6. Tagung Fahrerassistenz, Munich, Germany.
- Posner, M.I., Nissen, M.J., Ogden, W.C., 1978. Attended and unattended processing modes: The role of set for spatial location. In: Pick, H.J., Salzman, I.J. (Eds.), *Modes of Perceiving and Processing Information*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, pp. 137–157.
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., Bengler, K., 2014. How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 58 (1), 2063–2067.
- Rockwell, T., 1972. Eye movement analysis of visual information acquisition in driving: An overview. *Proceedings of the 6th Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, August 1972, Canberra pp. 316–331.
- Ruscio, D., Ciceri, M.R., Biassoni, F., 2015. How does a collision warning system shape driver's brake response time? The influence of expectancy and automation complacency on real-life emergency braking. *Accid. Anal. Prev.* 77, 72–81.
- SAE International, 2014. *Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems (J3016)*. [http://standards.sae.org/j3016\\_201401/](http://standards.sae.org/j3016_201401/).
- Salvucci, D.D., Taatgen, N.A., 2008. Threaded cognition: an integrated theory of concurrent multitasking. *Psychol. Rev.* 115, 101–130.
- Salvucci, D.D., Taatgen, N.A., 2011. Toward a unified view of cognitive control. *Topics Cognitive Sci.* 3, 227–230.
- Schweitzer, N., Apter, Y., Ben-David, G., Liebermann, D.G., Parush, A., 1995. A field study on braking responses during driving II. Minimum driver braking times. *Ergonomics* 38 (9), 1903–1910.
- Sivak, M., 1996. The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception* 25 (9), 1081–1090.
- Stanton, N.A., Marsden, P., 1996. From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of automation in vehicles. *Saf. Sci.* 24 (1), 35–49.
- Underwood, G., 2007. Visual attention and the transition from novice to advanced driver. *Ergonomics* 50 (8), 1235–1249.
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., Crundall, D., 2003. Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. *Ergonomics* 46, 629–646.
- Victor, T.W., 2005. *Keeping Eye and Mind on the Road* (Dissertation). University of Uppsala.
- Victor, T.W., Harbluk, J.L., Engström, J.A., 2005. Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 8 (2), 167–190.
- Waldhausen, J., Weiss, E., Pion, O., Henze, R., Küçükay, F., 2013. *Evaluierung unterschiedlicher Methoden zur Ablenkungserkennung*. 13. Braunschweiger Symposium AAET, Brunswick, Germany, pp. 2013.
- Wiener, E., Curry, R., 1980. Flight-deck automation: promises and problems. *Ergonomics* 23 (10), 995–1011.



# Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving



Kathrin Zeeb<sup>a,b,\*</sup>, Axel Buchner<sup>b</sup>, Michael Schrauf<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Daimler AG, Research and Development, Hanns-Klemm-Str. 45, D-71032 Böblingen, Germany

<sup>b</sup> Heinrich Heine University Düsseldorf, Department of Experimental Psychology, Universitätsstr. 1, D-40225 Düsseldorf, Germany

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 27 August 2015

Received in revised form 25 March 2016

Accepted 3 April 2016

### Keywords:

Automated driving  
Conditional automation  
Driver distraction  
Driver take-over  
Driving simulator

## ABSTRACT

Currently, development of conditionally automated driving systems which control both lateral and longitudinal vehicle guidance is attracting a great deal of attention. The driver no longer needs to constantly monitor the roadway, but must still be able to resume vehicle control if necessary. The relaxed attention requirement might encourage engagement in non-driving related secondary tasks, and the resulting effect on driver take-over is unclear.

The aim of this study was to examine how engagement in three different naturalistic secondary tasks (writing an email, reading a news text, watching a video clip) impacted take-over performance. A driving simulator study was conducted and data from a total of 79 participants (mean age 40 years, 35 females) were used to examine response times and take-over quality. Drivers had to resume vehicle control in four different non-critical scenarios while engaging in secondary tasks. A control group did not perform any secondary tasks.

There was no influence of the drivers' engagement in secondary tasks on the time required to return their hands to the steering wheel, and there seemed to be only little if any influence on the time the drivers needed to intervene in vehicle control. Take-over quality, however, deteriorated for distracted drivers, with drivers reading a news text and drivers watching a video deviating on average approximately 8–9 cm more from the lane center. These findings seem to indicate that establishing motor readiness may be carried out almost reflexively, but cognitive processing of the situation is impaired by driver distraction. This, in turn, appears to determine take-over quality. The present findings emphasize the importance to consider both response times and take-over quality for a comprehensive understanding of factors that influence driver take-over.

Furthermore, a training effect in response times was found to be moderated by the drivers' prior experience with driver assistance systems. This shows that besides driver distraction, driver-related factors influencing take-over performance exist.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Driver assistance systems are widely used today. Although the first systems were mainly safety systems (e.g., electronic stabilization program, antilock braking system), more advanced systems now not only improve road safety, but also aim to increase driver comfort by taking over (parts of) the driving task. Specifically, increasing effort is put in developing conditionally automated driving systems which take over both longitudinal and lateral vehicle control. According to the definition of conditionally automated sys-

tems as given by [SAE International \(2014\)](#), the driver no longer has to constantly monitor the driving environment and is consequently enabled to engage in non-driving related tasks. However, the driver must still be able to take back vehicle control if necessary. It is this aspect that has stimulated research on driver take-over in the last few years.

### 1.1. Driver take-over

A conditionally automated driving system must be able to detect system boundaries (e.g., missing lane markings, construction sites, heavy weather conditions). If such a system boundary is detected, a take-over request is prompted and the driver has to take over vehicle control within a sufficient (to be defined) time budget. Several perceptual, information processing, and action-based processes during driver take-over have been identified ([Gold and Bengler,](#)

\* Corresponding author at: Daimler AG, Research and Development, Hanns-Klemm-Str. 45, Böblingen D-71032, Germany.

E-mail addresses: [kathrin.zeeb@daimler.com](mailto:kathrin.zeeb@daimler.com) (K. Zeeb), [axel.buchner@hhu.de](mailto:axel.buchner@hhu.de) (A. Buchner), [michael.schrauf@daimler.com](mailto:michael.schrauf@daimler.com) (M. Schrauf).

2014; Zlocki and Eckstein, 2014) which appear to proceed partly sequentially and partly in parallel (Zeeb et al., 2015). In the following, these aspects of driver take-over are described for a visually distracted driver.

Subsequent to a take-over request, drivers redirect their gaze from the secondary task to the roadway. If necessary, they will also return their hands to the steering wheel and their feet to the pedals. By doing so, drivers establish motor readiness, allowing them to intervene in vehicle control (Zeeb et al., 2015). Previous studies report reaction times of about 0.7–1 s for the first road fixation, and 1.2–1.8 s for the first contact with the steering wheel (Gold et al., 2013; Zeeb et al., 2015). In case drivers are visually distracted and not looking at the roadway when a take-over request is initiated, the cognitive processing of the take-over situation may start as soon as they shift their visual focus back to the street (Gold and Bengler, 2014; Zeeb et al., 2015). This includes perceiving the situation and updating the current mental model by integrating relevant elements into a coherent model of the situation (Endsley, 1995). Based on the mental model, an action can be selected and executed, resulting in an actual driver intervention in longitudinal or lateral vehicle control by steering, braking or accelerating.

### 1.2. Factors influencing driver take-over

Take-over time and quality were shown to be influenced by several factors such as involvement in a secondary task (Merat et al., 2012), the complexity and criticality of the driving situation (Merat et al., 2012; Radlmayr et al., 2014), or modality and intensity of the take-over request (Naujoks et al., 2014). Gold et al. (2013) further report that take-over time depended on the given time budget. Drivers showed longer response times when they were given a time budget of 7 s instead of 5 s. While most research conducted to date focused on external factors, there is also evidence for driver-related factors affecting take-over time and quality. The driver's strategy of monitoring the roadway was found to influence take-over performance (Zeeb et al., 2015). Gold and Bengler (2014) report faster and better driver reactions when encountering a take-over situation for the second time compared to the first time. While a behavioral adaptation after the first take-over situation can be expected, it remains unclear how learning effects play out for more than two take-over situations. Furthermore Larsson et al. (2014) found an influence of driver experience with ACC on response times to an unexpected driving event during automated driving. ACC-experienced drivers started braking faster than drivers inexperienced with ACC. However, the authors considered only one situation and point out the necessity to further examine how long it takes inexperienced drivers to adapt their response times. Hence, while there is some evidence for the impact of driver-related factors on the ability to resume vehicle control, some aspects remain unclear and require further research.

It should be assumed that such factors do not necessarily affect all aspects of driver take-over, but might have a selective effect on the single processing steps described above. Zeeb et al. (2015) found that the driver's individual monitoring strategy affects the time before the driver intervenes in vehicle control, but not the time the driver needs for the first glance at the road and for the first contact with the steering wheel. These authors thus assumed that early motor processes of driver take-over (i.e. hand and foot movements, redirecting the gaze at the roadway) might be mostly reflexive with little influence of the driver's mental state. In contrast, the time the driver needs for an intervention in vehicle control appeared to be affected by the driver's cognitive processing and his mental state. This goes hand in hand with results reported by Ruscio et al. (2015) which show that expecting an event influences the time needed for perceiving and mentally processing a warning stimulus. However,

expectation does not seem to affect the preparation and execution of a motor reaction in manual driving.

These findings suggest that motor processes and cognitive processing proceed partially in parallel, which is in line with Wickens' (1984) multiple resource theory. According to this theory, tasks can be processed concurrently as long as they do not require the same processing resources. Further examination of these assumptions is needed, with a special focus on non-driving related tasks. As the drivers' willingness to engage in secondary tasks was found to increase with higher levels of automation (Carsten et al., 2012; De Winter et al., 2014; Llaneras et al., 2013), it is vital to gain understanding of their impact on driver take-over. If the driver's mental state generally has little effect on the execution speed of motor processes, the same should hold for driver distraction.

### 1.3. Non-driving related tasks while automated driving

Studies on manual driving clearly show the vast impact of the performance of secondary tasks on road safety (e.g., Dingus et al., 2006; Engström et al., 2005; Greenberg et al., 2003; Horrey and Wickens, 2007). However, it remains unclear whether these findings can easily be transferred into the domain of automated driving.

Engagement in visually demanding secondary tasks during manual driving may cause cognitive overload (Gugerty et al., 2004; Ma and Kaber, 2005; Neubauer et al., 2012). However, as automation decreases mental workload (Ma and Kaber, 2005; Stanton et al., 2001), it remains uncertain how the reduced load level interacts with the execution of secondary tasks. In fact, Young and Stanton (2002a) warn that cognitive underload caused by automation "is at least as serious an issue as overload" (p. 179). In the Malleable Attentional Resources Theory, they propose that the capacity of attentional resources is to some extent adaptive to the task demands, and automation thus leads to a temporary reduction of the accessible attentional resources. When faced with an automation failure, the operator's limited maximum capacity may not allow the situation to be dealt with appropriately, leading to performance degradation (Young and Stanton, 2002a,b). In line with that, Neubauer et al. (2012) report that the use of a cell phone leads to a decrease in response times during automated driving. They conclude that secondary tasks counteract the mental underload caused by automation and maintain the driver's alertness. Participants drove either manually or in an automated mode, and either with or without secondary tasks on urban and cross-country roads. It was found that secondary tasks delayed braking response times to an emergency event during manual driving. For automated driving, however, drivers with a secondary task reacted faster compared to drivers without a secondary task. Consequently, it remains unclear how different levels of mental workload generated by secondary tasks affect driver take-over following conditionally automated driving. Especially the relationship between perceived mental workload and take-over performance requires further examination.

Additionally, more attention should probably be paid to the type of secondary task. Most studies on automated driving use artificial or standardized tasks (e.g., the Surrogate Reference Task, Gold et al., 2013; Radlmayr et al., 2014; or quiz-like games, Merat et al., 2012). It is not clear whether these tasks induce a demand that is comparable to what drivers might actually be doing while driving automated vehicles in the future. The choice between standardized and naturalistic secondary tasks is mostly a trade-off between experimental control and ecological validity. Standardized tasks usually allow better control of task demands by specifically inducing different levels of cognitive, visual, or auditory load. Unfortunately, naturalistic secondary tasks do not necessarily have the same effects on manual driving as artificial tasks (Shinar et al., 2005; Young et al., 2003). For instance, Shinar and colleagues



**Fig. 1.** Left: Mercedes-Benz driving simulator. Middle: Example of the inside of the simulator cell with a C-Class. Right: Vehicle interior with the touch screen used for secondary tasks (a) and the system status display (b).

compared two types of phone tasks while driving manually, having an emotionally involving conversation, and solving math operations, which has been often used in previous research to simulate a phone conversation. The authors found that compared to the math task, conversations led to much smaller disruptive effects on driving performance. Hence, naturalistic secondary tasks need to be considered in addition to standardized tasks in order to examine the distractive potential of these tasks.

#### 1.4. Purpose of this study

The aim of this study was to examine the influence of engagement in naturalistic secondary tasks on take-over time and quality. The tasks were *writing an email*, *reading the news*, and *watching a video*, all of which can be expected to exert a relatively high level of visual and cognitive demand and to be attractive for the driver. A further aim was to test the model proposed by Zeeb et al. (2015), implying that the engagement in secondary tasks affects the visual and cognitive processing of the situation, but not the time needed to achieve motor readiness. Specifically, the time it takes to grasp the steering wheel was hypothesized to be unaffected by whether or not a secondary task was being performed. However, due to the impaired cognitive processing of the situation, driver intervention in vehicle control was expected to be delayed and take-over quality to be worse for drivers with a secondary task. Lastly, driver-related factors such as prior experience with ACC and learning effects should be examined in order to gain better understanding of how these affect the process of driver take-over.

## 2. Method

### 2.1. Participants

A total of 85 participants were recruited from a Daimler AG volunteer database. They were required to have a valid driver's license

**Table 1**  
Demographic features distributed across the different groups (see the main text for details). Absolute or relative numbers of participants are given for gender, mileage in the past year and prior experience with assistance systems. Means and standard deviations (in parentheses) are given for age and years of holding a valid driver's license. The variables were tested for differences among the groups using ANOVAs (age and possession of driver's license), Kruskal-Wallis test for ordinal data (mileage), and  $\chi^2$  tests for categorical data (gender and experience with assistance systems).

Group	Gender ( $n_{\text{female}}/n_{\text{male}}$ )	Age (years)	Driver's license held (years)	Mileage (1,000 km/year)				Drivers having used assistance systems before (%)		
				<5 (%)	5–10 (%)	10–20 (%)	>20 (%)	cruise control	adaptive cruise control	active lane keeping
1	4/6	45.8 (6.1)	26.9 (7.5)	0	20	50	30	80	70	50
2	6/5	38.4 (13.1)	20.7 (12.8)	9	36	46	9	100	64	46
3	5/7	40.4 (12.1)	20.8 (10.8)	0	42	33	25	83	42	33
4	3/8	37.6 (8.6)	19.4 (8.0)	9	18	46	27	91	27	27
5	7/5	35.3 (10.8)	16.8 (10.8)	0	17	58	25	92	58	42
6	6/6	36.6 (7.9)	18.6 (8.2)	0	17	58	25	92	73	64
7	4/7	43.4 (9.8)	25.6 (9.5)	0	36	37	27	91	55	64
Total	35/44	39.5 (10.3)	21.1 (10.1)	2	27	47	24	90	56	47
p-value	.78	.18	.19			.69		.81	.32	.51

and normal or corrected-to-normal vision. Six participants had to be excluded due to technical problems or incomplete recordings. As a result, datasets from 79 participants were included in the analysis. Main demographic features of the sample are presented in Table 1.

About 40% of the drivers stated that they never or rarely engaged in non-driving related tasks during manual driving, while 30% claimed to do that frequently or very often. The most frequent secondary tasks were hands-free phoning (47% frequently or very often), eating or drinking (18% frequently or very often), and using external devices (e.g., mobile phones; 15% frequently or very often). Participants were randomly assigned to either the control group without secondary tasks ( $n=11$ ) or one of the seven groups with secondary tasks ( $n=68$ ; further explained in Section 2.6, Table 3). The groups did not differ in their demographic characteristics (Table 1). Participants received monetary compensation for their participation and were free to terminate the experiment at any time without penalty. Data was collected confidentially.

### 2.2. Driving simulator

The study was conducted in the Mercedes-Benz driving simulator in Sindelfingen, Germany. This dynamic simulator consists of a hexapod cell, in which an actual car is placed, surrounded by a 360° projection screen (Fig. 1). The cell is mounted on six moveable legs on a 12 m long rail. The participants drove an E-Class sedan (W212). Three cameras attached inside the car cabin recorded the driver actions on the touch screen used for secondary tasks, the pedal system, and the steering wheel.

### 2.3. Conditionally automated driving system

During the test drive a conditionally automated driving system controlled the longitudinal as well as lateral guidance on the highway and could be activated and deactivated by the driver by a

button on the steering wheel. The system drove with a preset velocity of 120 km/h (75 mph) and adjusted the speed automatically in case of a slower leading vehicle. The system did not execute automatic lane changes. When the system was activated and detected a situation it could not handle, a take-over request was prompted by the system and the driver had to take over within a few seconds. Such a situation could be, for instance, a construction site ahead, the ending of the ego-lane, or missing lane markings. The driver could deactivate the system by steering or braking or by pressing the button on the steering wheel. The system used an absolute steering wheel angle velocity larger than  $0.075^\circ/\text{s}$  and absolute steering wheel angle acceleration larger than  $5^\circ/\text{s}^2$  to detect a steering intervention. A braking intervention was recognized when the standardized brake pedal travel was greater than 10%. The automated system had four different states (not available, available, activated, take-over request), which were displayed in a separate display on the left side of the steering wheel (Fig. 1, right). The system states are described in Table 2. The take-over request consisted of an acoustic warning and a red steering wheel icon which appeared in both the system status display and on the touch screen used for the secondary tasks (Fig. 1, right).

#### 2.4. Instructions

Participants signed consent forms and completed a demographic questionnaire including basic demographic information and experience with advanced driving assistance systems before they received instructions on the test drive. The latter included the information that the system would automatically control steering, braking/accelerating and the distance to a leading vehicle, but would not perform lane changes. The participants further received a description of the different system states as well as how to activate and deactivate the system. They were also provided with information on situations the system cannot handle, such as undetectable lane markings, or ending of the ego-lane. They were informed that in this case an auditory and visual take-over request would be emitted and the driver would have a few seconds to take over vehicle control. Subsequently, the system would deactivate itself automatically. The drivers were instructed to engage in secondary tasks while the system was activated (described in detail in Section 2.6), but were reminded that they were still responsible for the vehicle in the event of a take-over request. They were further asked to perform four training tasks on a laptop to get used to the custom-designed multimedia system in which the secondary tasks were integrated. This part was left out for the control group who did not conduct any secondary tasks during the drive. Finally, each individual driver was seated in the car.

#### 2.5. Test drive and take-over scenarios

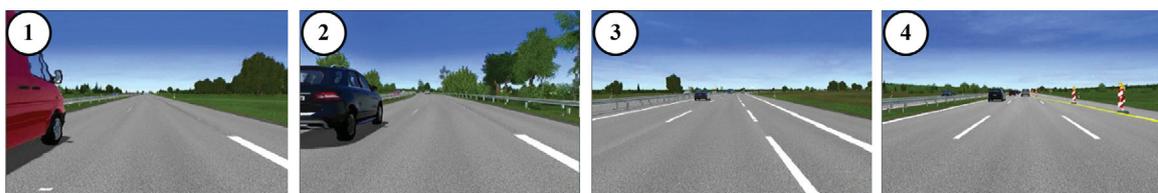
The entire test drive was 60 km (about 37 miles) long and took about 30 min. There were four take-over situations during the trip (Fig. 2). In the second and fourth take-over situation a driver intervention was necessary to avoid an accident. Based on these two situations the main analyses on take-over time and behavior were

**Table 2**  
States of the conditionally automated system.

System State	Description	System Status Display
Not available	Requirements for longitudinal or lateral control are not fulfilled	
Available	Requirements for longitudinal and lateral control are fulfilled. System is not yet active, but can be activated by the driver	
Activated	System is active and controls longitudinal and lateral vehicle guidance	
Take-over request	Activated system has detected a system limit and requires the driver to take over. System is deactivated either by a driver intervention or automatically after a certain time budget elapses	

conducted. In the first and third take-over situation, no accident could occur even without a driver intervention. The entire drive took place on a highway. There was moderate traffic on the highway in both directions, apart from the first 1:30 min of the training phase, which contained no surrounding vehicles. Occasionally the driver was overtaken by faster vehicles, but there were no slower vehicles on the driver's lane forcing the system to slow down. The test started with a 4:30 min training drive to acquaint participants with the driving simulator and the automated system. At the end of the training drive the vehicle reached a segment with faded lane markings that were not detectable by the system and the first take-over request was prompted (Fig. 2, no. 1). This situation was non-critical and mainly intended to give the drivers the possibility to get used to the take-over and was not included in the main analysis.

When the automated system was available again, drivers were asked to reactivate the system and to continue with the secondary tasks. After a further 23 km (approximately 11:30 min) of automated driving the system again issued a take-over request due to faded lane markings. This time, however, the take-over was triggered in a curve in the road (Fig. 2, no. 2). The driver had a time budget of 4 s to take over vehicle control before the system was deactivated automatically. As soon as the system was deactivated (either by a driver intervention or because the time budget had elapsed), a wind gust from the right hand side was triggered for 10 s with a velocity of 10 m/s, forcing the driver to react with a steering intervention to prevent a drift towards the left. After reactivating the system and further 3:30 min of automated driving, the roadway was expanded by a third lane on the right of the ego-lane (Fig. 2, no. 3). According to German law, the driver is required to drive on the rightmost lane except when overtaking. Thus, the driver had to take over the vehicle and conduct a lane change to the right. After about another 11 min the ego-lane ended due to construction



**Fig. 2.** The four take-over situations during the simulated drive: faded lane markings on a straight (1), faded lane markings in a curve with wind gust (2), additional lane (3) and blocking of the ego-lane (4).

work and the driver had to change to the middle lane (Fig. 2, no. 4). Accordingly, the speed limit was reduced about 1 km ahead of the take-over request to 80 km/h (about 50 mph). The system accordingly adjusted the vehicle's velocity to 80 km/h. Subsequently, a take-over request was triggered about 200 m before the end of the ego-lane. A relatively short time budget of 2.5 s before the system deactivated itself was used to ensure that, despite the low speed, criticality of the scenario was comparable to that of situation 2.

At the end of the drive, the driver was asked to stop on the shoulder. At this point the experiment was concluded and the participant was dismissed.

## 2.6. Non-driving related tasks

Non-driving related tasks were selected based on a previously conducted internal survey. A total of 96 participants were asked how often they would conduct certain non-driving related tasks, if their car was driving autonomously. As the aim of the present study was to examine visual-cognitive load, the most frequently mentioned tasks which required the driver to look away from the roadway were chosen. These were writing an email, reading a news text and watching a video. Other frequent responses were: talking to the passenger, relaxing, browsing the internet, eating and drinking, working on a laptop, social media use, or talking on the phone.

The tasks were provided in a fixed order during the period of automated driving so that in each take-over situation a group of drivers engaged in either an *email*, *news*, or *video* task. These tasks were integrated into a custom-designed multimedia system menu (Fig. 3) and presented on a 15" touch screen mounted on the center console (Fig. 1, right). The tasks were described in the *task* menu. The *email* task consisted of reading and replying to an invitation to a meeting. The email the drivers had to reply to was about 100 words long. In the *video* and *news* tasks, the participants were asked to select the appropriate menu and watch a video clip or read a news text, respectively. The news text was a general business article that did not require any specific knowledge about the topic. The video clip was an excerpt from a scientific television show. News text and video were long enough so that the drivers could not finish them before the take-over occurred (about 1200 words and 9 min, respectively). There was no time limit for finishing the tasks to ensure uninfluenced individual processing times. Type and order of the tasks were counterbalanced across the participants. Every participant was given every task type at least once during the ride. Two additional tasks were added to the longer automated drive of 11 min before take-over situations 2 and 4. These consisted of listening to music, watching video clips, or reading news texts

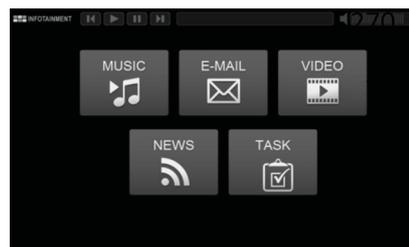


Fig. 3. Main menu of the multimedia system providing the secondary tasks.

(the email task was omitted as the time the drivers spent on it was too variable) and were chosen so that the drivers started about 2:30 min before the take-over with the actual experimental task. It was ensured that the drivers never conducted the same task type twice in a row throughout the whole drive, which resulted in six groups of task orders (Table 3).

Because there were four take-over situations but only three task types, one type of task was performed twice. Given that the main analyses were based on situations 2 and 4, the specific tasks in these situations were the same for each task type (e.g. drivers working on a *news* task read the same text). Additionally, a control group did not perform any secondary task at all. 12–13 participants were assigned to each group.

In addition to drop-outs due to technical problems, there were exclusions in each take-over situation for drivers who were not working on the designated task. The number of remaining participants in each situation is given in Table 3.

## 3. Results

### 3.1. Data analysis

To assess the time until motor readiness was achieved, response times were measured from the take-over request until the first gaze at the road (*time to eyes on*) and until the driver's hands first touched the steering wheel (*time to hands on*). Both variables were collected via video labeling by two different raters based on the recordings of the three interior cameras. *Time to eyes on* could not be assessed for the control group, because most of the drivers without a secondary task were looking at the roadway most of the time. Further, time until deactivation of the automated system was recorded (*time to system deactivation*). Deactivation could be due to either a steering or braking intervention according to the criteria described above (Section 2.3), or due to an automatic deactivation after the expiry of the given time budget. The deviation from the center of the lane as

**Table 3**  
Order of secondary tasks as well as the number of initially assigned and remaining participants after excluding the drop-outs due to technical reasons. Tasks during take-over are printed in bold. The last line gives the final number of participants after excluding those not performing the correct task.

Group	<i>n</i> (actual / planned)	S1	S2	S3	S4
1	10 / 12	<b>email</b> music video	<b>news</b> video	music news	<b>video</b>
2	11 / 12	<b>news</b> music news	<b>video</b> email	music video	<b>email</b>
3	12 / 12	<b>video</b> music video	<b>email</b> news	music video	<b>news</b>
4	11 / 12	<b>email</b> music news	<b>video</b> news	music video	<b>news</b>
5	12 / 13	<b>news</b> music video	<b>email</b> video	music news	<b>video</b>
6	12 / 12	<b>video</b> music video	<b>news</b> email	music video	<b>email</b>
7	11 / 12	-	-	-	-
Remaining participants after excluding those not on correct task		<i>n</i> <sub>control</sub> =11 <i>n</i> <sub>email</sub> =18 <i>n</i> <sub>news</sub> =22 <i>n</i> <sub>video</sub> =24	<i>n</i> <sub>control</sub> =11 <i>n</i> <sub>email</sub> =22 <i>n</i> <sub>news</sub> =22 <i>n</i> <sub>video</sub> =16	<i>n</i> <sub>control</sub> =11 <i>n</i> <sub>email</sub> =19 <i>n</i> <sub>news</sub> =20 <i>n</i> <sub>video</sub> =22	<i>n</i> <sub>control</sub> =11 <i>n</i> <sub>email</sub> =18 <i>n</i> <sub>news</sub> =21 <i>n</i> <sub>video</sub> =22

well as the lateral acceleration over a certain period of time after the driver took over were evaluated as measures for take-over quality and vehicle stabilization.

Firstly, the impact of distraction on driver take-over was analyzed (Section 3.2). For this purpose, take-over situations 2 and 4, which required a driver intervention in order to prevent an accident, were analyzed separately. For situation 2, a contrast analysis was used to compare response times and take-over quality of the three driver groups with secondary tasks to the control group without secondary task.

In situation 4, 10% of all drivers intervened before a take-over request was prompted, presumably due to the deceleration before the end of the ego-lane and the expectation of a take-over request. For these drivers it did not seem reasonable to analyze response times referring to the take-over request. Hence, in this situation, only the number of drivers taking over before and after the request was analyzed, as well as the distance to the end of the ego-lane upon taking over.

For statistically significant differences, Cohen's  $d$  and  $f$  are reported as measures of the sample effect sizes. A sensitivity analysis (Faul et al., 2007) showed that for comparisons across tasks (*email*, *news*, *video*) given  $\alpha = \beta = .05$  and  $N = 60$  effects of size  $f = 0.52$  can be detected; this effect size is somewhat larger than what is conventionally regarded as a "large" effect ( $f = 0.40$  in this case, cf. Cohen, 1988).

Secondly, the influence of driver-related factors on driver take-over was examined (Section 3.3), including the individual stability of response times, time effects, and drivers' experience with ACC. Take-over situations 1 and 3 were included in these analyses to cover a longer time period.

### 3.2. Influence of distraction on driver take-over

#### 3.2.1. Take-over situation 2: faded lane markings with wind gust

There were no differences in *time to hands on* ( $F(3, 63) = 1.57, p = .21$ ) and *time to system deactivation* ( $F(3, 67) = 2.53, p = .06$ ) among the four driver groups. In total, 36.6% of the drivers let the time budget elapse before taking over (control group: 36.4%, *email*: 27.3%, *news*: 31.8%, *video*: 56.3%). Comparing only those drivers who intervened within the given time budget, there was a significant difference among the driver groups ( $F(3, 43) = 4.39, p = .009, f = 0.55$ ). Contrast tests revealed that drivers watching a *video* ( $M = 3.02, SD = 0.73$ ) deactivated the system significantly later than the control group ( $M = 1.86, SD = 0.59; p = .004; d = 1.72$ ), while there was no difference between drivers working on an *email* or *news* task compared to the control group. The three different secondary tasks did not differ in *time to eyes on*, which was not recorded for the control group ( $F(2, 50) = 0.13, p = .88$ ). All response times are displayed in Fig. 4.

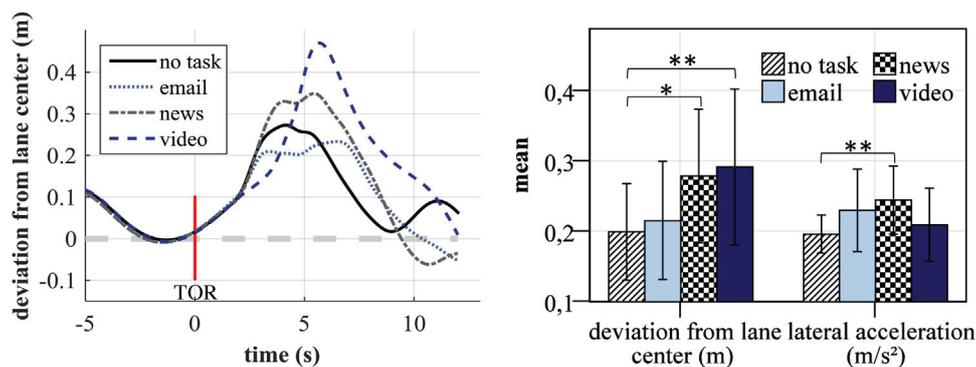


Fig. 5. Left: average deviation from lane center of the four driver groups over the 10s after the take-over request (TOR), during which the wind gust was active. Right: average deviation from lane center and average lateral acceleration of the four driver groups over the time period of 10 s after the take-over request. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

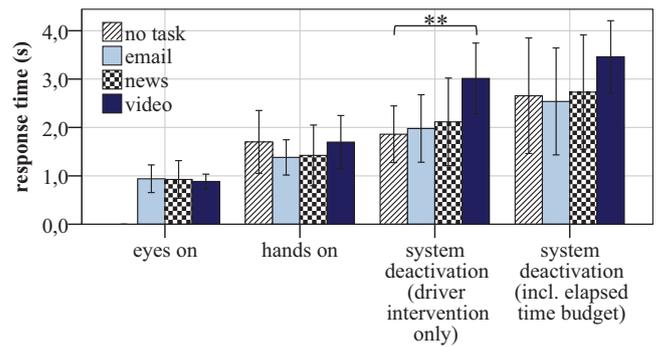


Fig. 4. Response times in take-over situation 2 for the four driver groups. Means with standard deviations as error bars. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

Regarding take-over quality, differences were found among the four driver groups in the average deviation from lane center ( $F(3, 67) = 3.94, p = .01, f = 0.42$ ), as well as in the average lateral acceleration ( $F(3, 67) = 2.90, p = .04, f = 0.36$ ) in the 10 s after taking over, during which the wind gust was active. Both drivers with a *news* ( $M = 0.28 \text{ m}, SD = 0.10$ ) and a *video* task ( $M = 0.29 \text{ m}, SD = 0.11$ ) showed a larger deviation from the lane center than drivers without secondary task ( $M = 0.20 \text{ m}, SD = 0.07; p_{\text{news-control}} = .02; d_{\text{news-control}} = 0.88; p_{\text{video-control}} = .01; d_{\text{video-control}} = 0.94$ ). Drivers engaging in a *news* task ( $M = 0.25 \text{ m/s}^2, SD = 0.05$ ) were found to have larger lateral acceleration than drivers of the control group ( $M = 0.20 \text{ m/s}^2, SD = 0.03; p = .01; d = 1.12$ ). Measures of take-over quality are depicted in Fig. 5.

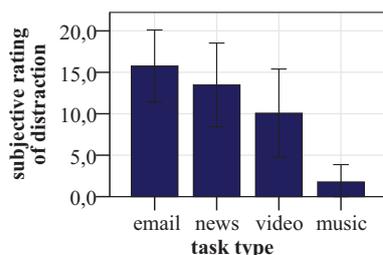
In order to assess whether take-over quality was influenced by differences in road characteristics due to variations in the onset of the wind gust, road curvature and the ego-vehicle's distance to the surrounding traffic on the left lane were calculated and examined. There was no relationship between *time to system deactivation* and the distance to the surrounding traffic at wind onset ( $r = -.07, p = .55$ ). Road curvature at wind onset, on the other hand, was found to be correlated with *time to system deactivation* ( $r = -.44, p \leq .01$ ). However, there was neither a relationship between road curvature and deviation from lane center ( $r = .04, p = .74$ ), nor between road curvature and lateral acceleration ( $r = .04, p = .72$ ). Hence, no evidence could be found that take-over quality was influenced by differences in road characteristics.

#### 3.2.2. Subjective ratings of distraction

After completing the drive, participants were asked to rate how distracting they perceived the three different task types while automated driving on a scale from 0 (*very little*) to 20 (*very much*). *Listening to music* was included as a reference task, which the participants conducted twice during the automated drive, though not

**Table 4**  
Mean take-over performance (standard deviations in parentheses) for driver groups with low ( $n=18$ ), medium ( $n=21$ ), and high ( $n=21$ ) levels of subjective distraction; test statistics of the group comparisons.

		rating of distraction	eyes on (s)	hands on (s)	system deactivation (s)	deviation from lane center (m)	lateral acceleration ( $m/s^2$ )
level of subjective distraction	low	6.83 (3.59)	0.77 (0.30)	1.51 (0.59)	3.16 (0.99)	0.28 (0.11)	0.21 (0.05)
	medium	14.71 (1.32)	0.98 (0.25)	1.52 (0.64)	3.03 (1.08)	0.28 (0.08)	0.23 (0.05)
	high	18.57 (1.02)	0.99 (0.33)	1.41 (0.35)	2.42 (1.13)	0.26 (0.10)	0.24 (0.07)
test statistics	<i>df</i>	–	2, 50	2, 53	2, 57	2, 57	2, 57
	<i>F</i>	–	2.62	0.23	2.22	2.72	1.45
	<i>p</i>	–	.08	.79	.08	.18	.24



**Fig. 6.** Subjective rating of how distracting the different task types were perceived during the automated drive from 0 (*very little*) to 20 (*very much*).

in a take-over situation. Among the three task types conducted during driver take-over, *email* ( $M=15.76$ ,  $SD=4.35$ ) was rated the most distracting and *video* the least ( $M=10.07$ ,  $SD=5.32$ ; Fig. 6). In order to examine the relationship of subjective ratings and take-over performance independent from the task type, participants with secondary tasks were categorized according to their rating in situation 2 into three groups. This was done so that the resulting groups contained about the same number of drivers. There were no differences between drivers with a low, medium, and high subjective level of distraction in response times or take-over quality (Table 4).

### 3.2.3. Take-over situation 4: end of ego-lane

Due to the deceleration about 1.1 km before the end of the ego-lane, 10% of all drivers intervened before a take-over request was prompted. This happened more frequently among drivers without a secondary task (36%) than among distracted drivers (*email*: 11%, *news*: 0%, *video*: 5%;  $\chi^2(3)=11.87$ ,  $p=.008$ ). Accordingly, the driver group had an influence on the distance to the end of the ego-lane when deactivating the system ( $F(3, 68)=8.60$ ;  $p\leq .001$ ,  $f=0.62$ ), with non-distracted drivers ( $M=413.86$  m,  $SD=368.74$ ) deactivating the system significantly longer before the end of the ego-lane than drivers reading a news text ( $M=153.96$  m,  $SD=5.95$ ;  $p=.042$ ;  $d=-1.19$ ) and drivers watching a video ( $M=162.28$  m,  $SD=41.33$ ;  $p=.047$ ;  $d=-1.22$ ); difference to drivers writing an email just missed the preset level of statistical significance ( $M=177.38$  m,  $SD=94.85$ ;  $p=.06$ ;  $d=0.99$ ).

### 3.3. Influence of driver-related factors on driver take-over

In order to consider driver-related factors affecting driver take-over, the individual stability of take-over as a function of time, learning effects, and the drivers' prior experience with driving assistance systems were examined.

#### 3.3.1. Individual stability of driver take-over

To evaluate the stability of the drivers' take-over behavior over time, *time to eyes on* (distracted drivers only) and *time to hands on* (distracted and non-distracted drivers) of all four take-over situations were correlated with the corresponding time of the previous situation (Fig. 7).

For both variables, all of these pairwise correlations were significantly different from zero (Table 5). For *time to hands on* there was an increase in the strength of the correlation coefficient over time. Situations 3 and 4 revealed a stronger relationship than both situations 2 and 3 ( $z=1.77$ ,  $p\leq .05$ ) and situations 1 and 2 ( $z=2.13$ ,  $p\leq .05$ ).

#### 3.3.2. Time effects

In order to examine time effects, mean response times of all drivers were compared between the four take-over situations using repeated measures ANOVAs with Greenhouse-Geisser correction (Fig. 8). There were differences between the situations found in *time to eyes on* ( $F(1.48, 41.33)=7.84$ ;  $p=.003$ ;  $\eta_p^2=0.22$ ), *time to hands on* ( $F(2.44, 151.11)=7.65$ ;  $p\leq .001$ ;  $\eta_p^2=0.11$ ), as well as in *time to system deactivation* ( $F(1.61, 109.68)=23.47$ ;  $p\leq .001$ ;  $\eta_p^2=0.26$ ). Pairwise comparisons revealed that *time to eyes on* was longer in situation 1 ( $M=1.17$ ,  $SD=0.48$ ) compared to situation 4 ( $M=0.89$ ,  $SD=0.25$ ;  $p=.01$ ;  $d=0.72$ ), while differences between the other situations failed to reach statistical significance. *Time to hands on* was longer in situation 1 ( $M=1.74$ ,  $SD=0.52$ ) compared to both situations 3 ( $M=1.45$ ,  $SD=0.32$ ;  $p\leq .001$ ;  $d=0.67$ ) and 4 ( $M=1.54$ ,  $SD=0.39$ ;  $p=.03$ ;  $d=0.44$ ). Regarding *time to system deactivation* all pairwise comparisons were found to reach statistical significance ( $p\leq .001$  for all comparisons), with the exception of situation 1 compared to situation 4. This, however, does not appear to be a learning effect.

#### 3.3.3. Experience with driving assistance systems

It was assessed how often drivers used adaptive cruise control (ACC) in their everyday driving (from *never* until *5 - several times per week*). The relationship between experience with ACC and *time to eyes on* (distracted drivers only) as well as *time to hands on* (distracted and non-distracted drivers) was examined in all four take-over situations.

Whereas significant correlations indicating shorter response times with increasing experience between *time to eyes on* and ACC experience were found for the first two take-over situations ( $r_1=-.38$ ,  $p=.004$ ;  $r_2=-.32$ ,  $p=.01$ ), this relationship disappeared over time ( $r_3=-.04$ ,  $p=.79$  and  $r_4=-.17$ ,  $p=.28$ ). There was no significant correlation between *time to hands on* and ACC experience ( $p\geq .10$  for all situations).

To further examine this change over time, *time to eyes on* and *time to hands on* were analyzed for differences between situation 1

**Table 5**

Pearson's correlation coefficients of *time to eyes on* and *time to hands on* for each take-over situation (s1, 2, 3, 4; listwise exclusion of missing values,  $n_{eyeson}=29$ ,  $n_{handson}=63$ ). \*  $p\leq .05$ . \*\*  $p\leq .01$ .

situation	time to eyes on			time to hands on		
	s2	s3	s4	s2	s3	s4
s1	$r=.53^{**}$	$r=.37^*$	$r=.36$	$r=.35^{**}$	$r=.38^{**}$	$r=.30^*$
s2	–	$r=.67^{**}$	$r=.66^{**}$	–	$r=.44^{**}$	$r=.53^{**}$
s3	–	–	$r=.69^{**}$	–	–	$r=.62^{**}$

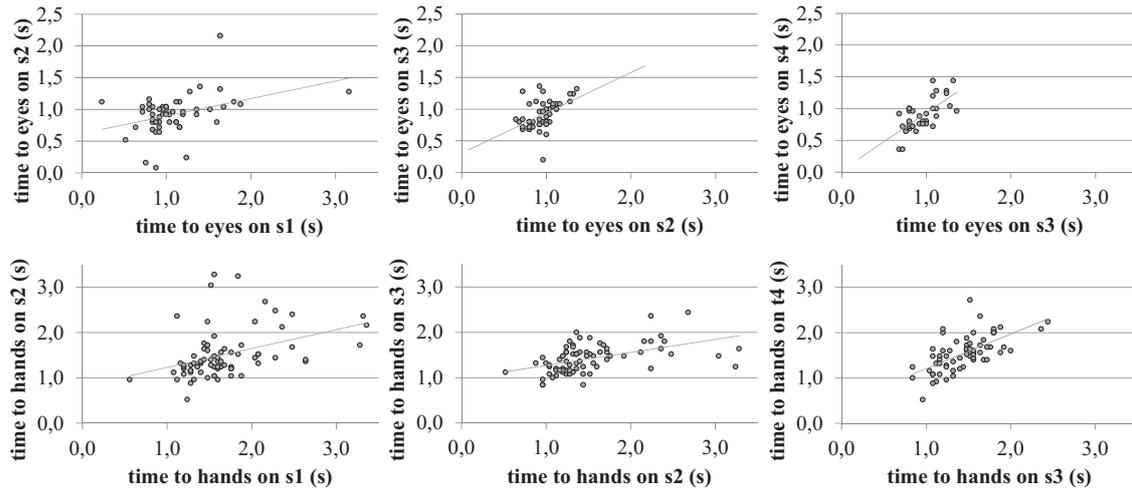


Fig. 7. Correlation of *time to eyes on* (top) and *time to hands on* (bottom) for each take-over situation (s1, 2, 3, 4) with the previous situation.

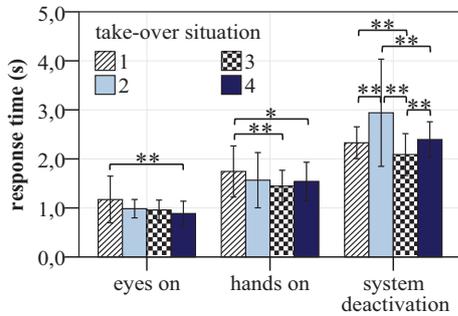


Fig. 8. Comparison of *time to eyes on* (distracted drivers only), *time to hands on* (distracted and non-distracted drivers), and *time to system deactivation* (distracted and non-distracted drivers) in all four take-over situations. Means with standard deviations as error bars. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

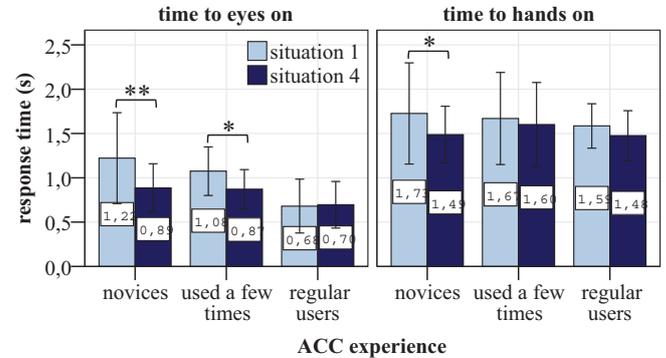


Fig. 9. *Time to eyes on* (left) and *time to hands on* (right) in take-over situations 1 and 4 for drivers who had never used ACC before, used it a few times, or used it regularly. Means with standard deviations as error bars. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

and 4 separately for ACC novices who had never used ACC before ( $n = 35$ ), drivers who had used ACC a few times ( $n = 31$ ), and drivers who use ACC at least a few times per month ( $n = 12$ ).  $t$ -tests showed a significant decrease from situation 1 to situation 4 for ACC novices in *time to eyes on* ( $t(45) = 2.70$ ;  $p = .01$ ;  $d = 0.79$ ; Fig. 9, left) and *time to hands on* ( $t(51.85) = 2.04$ ;  $p = .05$ ;  $d = 0.51$ ; Fig. 9, right). Drivers who had used ACC a few times likewise had longer *time to eyes on* in situation 1 than in situation 4 ( $t(38) = 2.47$ ;  $p = .02$ ;  $d = 0.84$ ), even though no difference was found in *time to hands on* ( $t(57) = 0.53$ ;  $p = .60$ ). Regular ACC users had equally long *time to eyes on* ( $t(11) = -0.10$ ;  $p = .93$ ) and *time to hands on* ( $t(18) = 0.92$ ;  $p = .37$ ) in both situations.

#### 4. Discussion

The main objective of this study was to examine the impact of the drivers' engagement in three different naturalistic non-driving related tasks (*writing an email, reading the news and watching a video clip*) on take-over time and quality in non-time critical situations. Moreover, driver-related influencing factors were examined.

##### 4.1. Influence of distraction on driver take-over

According to the model proposed by Zeeb et al. (2015), the establishment of motor readiness (*time to hands on*) was expected to be unaffected by driver distraction. However, distracted drivers were hypothesized to need more time for the cognitive processing of the situation, resulting in a delayed intervention in vehicle control and

a deteriorated take-over quality. The results of take-over situation 2 only partly confirmed these assumptions.

In line with the hypotheses, no difference in the time until the drivers' hands touched the steering wheel was found among the four driver groups, supporting the assumption that the driver's mental state has little influence on the preparation and execution of these apparently reflexive motor actions. Even though this finding is in accordance with those reported by Ruscio et al. (2015) and by Zeeb et al. (2015), a direct measurement of the drivers' mental processing time would be necessary in order to actually verify this assumption.

Contrary to our expectations, there was no difference among groups in the *time to system deactivation*, even though differences just missed the level of statistical significance. One possible reason for this could be that the take-over situations were not time-critical and did not require an immediate driver intervention. Thus, many drivers allowed the whole time budget to elapse after the take-over request and intervened only after the system was automatically deactivated. This interpretation is supported by the fact that an influence of driver distraction was found when considering only drivers who intervened within the given time budget of 4 s. Drivers watching a video deactivated the system later than drivers without a secondary task. Hence, a potential effect of driver distraction might have been masked by an overly long time budget before an action was necessary. Note, however, that the sample sizes underlying these comparisons, especially for drivers reacting within the time budget, were relatively small, such that only large effects

could be detected with reasonable error probabilities. These results should be replicated with more reliable sample sizes.

Even though there was little if any effect on response times, driver distraction was found to impact take-over quality. Drivers engaging in the news and video task were found to have a larger deviation from lane center compared to the control group. Further, drivers with a news task showed a larger lateral acceleration. As there were no differences in *time to hands on* among the driver groups, this suggests that the quality of the take-over is determined by the driver's cognitive processing of the situation, but remains largely independent of the execution speed of motor actions. It furthermore emphasizes the necessity to consider take-over quality in addition to response times when examining driver take-over.

In sum, even though the engagement in non-driving related tasks did not seem to tremendously deteriorate take-over performance (e.g., no accident occurred), no positive effects of secondary task use could be found. This is in contrast to the results of Neubauber et al. (2012), who suggested that secondary task usage enhances alertness and thereby decreases response times. However, non-time critical situations were examined in the present study and the comparability to studies with more critical scenarios might be limited. Further research on the divergence of these findings and studies reporting negative effects of secondary task engagement (e.g., Merat et al., 2012) is thus needed, especially with focus on the task type (cognitive vs. visual-cognitive demands), and the take-over scenario (criticality, time budget, longitudinal vs. lateral driver intervention, etc.). Furthermore, long-term usage of automation should be taken into account, because stimulating effects of non-driving related tasks might become more important for longer automated drives.

#### 4.2. Subjective ratings of distraction

An unexpected result in both situations was that for one of the tasks, namely writing an email, there was no significant difference to the control group with regard to any of the variables. It could be assumed that the email task was simply less demanding than the other two tasks. The subjective rating of distraction, however, suggests exactly the opposite. *Email* was rated the most distracting and *video* the least. In fact, no differences in objective measures of take-over performance could be found between drivers with low, medium, and high subjective ratings of distraction, even though differences in *time to eyes on* and *time to system deactivation* were just slightly above statistical significance. One possible reason for this could be that drivers had difficulties rating their workload. This interpretation gains plausibility from a number of previous studies reporting a dissociation of subjective and objective measures of secondary task demands while manual driving (e.g., Horrey et al., 2009; Lesch and Hancock, 2004; Patel et al., 2008). Horrey and colleagues not only found a divergence between objective driving performance and perceived secondary task demands, but also between driving performance and subjective estimates of performance. The authors hence assume that drivers are not aware of performance decrements due to driver distraction, and as a consequence misjudge secondary task demands. Another possibility could be that drivers may not necessarily misjudge task demands, but that these task demands affect take-over performance differently compared to manual driving. For instance, following Young and Stanton's (2002a) Malleable Attentional Resources Theory (see Section 1) the deteriorated take-over performance of drivers watching a video could be explained by assuming that watching a video turns the driver into a more or less passive recipient with a reduced level of alertness. In contrast, when writing an email the driver is cognitively and physically more engaged and may be more alert. Additionally, watching a video might be a more continuously distracting task whereas writing an email or reading a text is more

segmented by the pauses between sentences or paragraphs during which drivers could be alerted more quickly. This theory, however, does not explain why drivers without a secondary task and hence presumably with the lowest level of alertness still showed the best take-over performance.

#### 4.3. Driver-related influencing factors

Further driver-related factors were found to influence take-over performance. Time to eyes on and time to hands on decreased over time. This most likely reflects the drivers' behavioral adaptation. The only statistically significant differences were found between situation 1 and 4 (time to eyes on, time to hands on), and between situation 1 and 3 (time to hands on). It hence appears that on average, drivers adapted rather quickly to the take-over situations, with negligible changes due to learning after the first take-over. A more differentiated picture of these time effects is obtained by additionally taking the drivers' prior experience with ACC into account. Drivers who had never used ACC before showed the largest differences between the first and last take-over situation with an average decrease of about 0.3 s in time to eyes on and 0.2 s in time to hands on. On the other hand, no difference between both situations could be found for drivers who regularly used ACC. Learning effects thus seem to be moderated by the drivers' ACC experience. This shows that drivers inexperienced with driver assistance systems need some time to get used to automated systems. However, the number of drivers with considerable experience with ACC was relatively small and the presented findings should be replicated with a larger sample size before drawing firm conclusions.

The differences in *time to system deactivation* among the four situations were unsystematic and did not appear to be learning effects. System deactivation in situation 2 happened noticeably later compared to the other situations, which seems to reflect the longer time budget of 4 s in this situation. Moreover, the fact that the situations were not critical and did not require an immediate driver intervention might have affected the drivers' reactions. This is in line with previous findings showing that the given time budget affects the time of driver intervention. The more time given, the longer it takes the driver to intervene (Gold et al., 2013). This fact may emphasize the importance of driver-related factors even more. If drivers try to make full use of the given time budget, they need to estimate the remaining time. Thereby individual factors like the driver's sensitivity to the remaining time budget, or the perceived criticality and urgency of the situation might come into play.

Despite the influence of time and ACC experience on driver take-over, there was still considerable individual stability over time for the achievement of motor readiness, which increased as a function of driving time. This strengthens the assumption that drivers need some time to adapt to automated systems. Even though the current data show no larger changes in the time until motor readiness was established after situation 1, it is not known how long-term use of automation might affect driver take-over. Possible effects of vigilance or fatigue on driver take-over are as yet unknown, and there could be behavioral adaptations of drivers due to long-term or regular use of automation. Furthermore, it is not clear how trust in automation, which is assumed to affect reaction times (Parasuraman et al., 1993), is influenced by the long-term use of automated driving systems and the frequency of take-over requests. In the present study, the first take-over situation occurred rather early (within the first 5 min of conditionally automated driving) and take-over request 2 and 3 were issued within a short period of 5 min, which might have degraded the drivers' automation trust, preventing an overreliance on the automated system. Hence, for future research a systematic variation of these factors is needed.

#### 4.4. Limitations of the present study

The present study has several limitations. The order of take-over scenarios was not counterbalanced and learning effects over time could be found, especially for drivers having little prior experience with advanced driver assistance systems. Even though drivers generally appeared to behaviorally adapt rather quickly to the take-over situations, some residual learning can still be assumed to limit the comparability of the different scenarios. Furthermore, the sample size in the present study was small, particularly that of the control group. The present results should therefore be interpreted with caution and with the fact in mind that only quite large effects could be detected with conventional alpha and beta error probabilities. Given the divergence of take-over performance and subjective ratings of distraction, a closer and more systematic examination of subjective task demands might have been insightful, especially with regard to existing theories and approaches. Future research should also include a measure of secondary task performance, as the drivers' interest and internal motivation might vary.

#### 5. Conclusions

The data reported here has several implications. Even though there were little if any effects of driver distraction on response times, take-over quality was found to be impaired for drivers watching a video and drivers reading a news article. This finding may be interpreted to support the assumption that the motor processes are carried out almost reflexively with little influence of the driver's mental state. However, a closer examination of the drivers' cognitive processing time would be needed in order to test this assumption more thoroughly. The present findings also suggest that take-over quality is largely independent of the execution speed of motor actions, but rather would appear to be determined by the drivers' cognitive processing of the situation. This shows that for a comprehensive understanding of driver take-over, both response times and take-over quality must be considered. The fact that no relationship between subjective and objective secondary task demands was found reveals the need to further examine the influence of secondary tasks on driver take-over, with better differentiation of concepts like alertness or workload. The reported influence of driver-related factors moreover emphasizes the need to take sample composition and demographic factors into greater account in future research.

It must be borne in mind that these findings refer to non-time critical "normal" take-over situations. They have no direct implications for safety-critical take-over situations which will hopefully remain an exception in future conditionally automated driving.

#### References

- Carsten, O., Lai, F., Barnard, A., Merat, N., Jamson, A., 2012. Control task substitution in semi-automated driving: does it matter what aspects are automated? *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54 (5), 747–761.
- Cohen, J., 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- De Winter, J., Happee, R., Martens, M., Stanton, N.A., 2014. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: a review of the empirical evidence. *Trans. Res. F: Traffic Psychol. Behav.* 24, 196–217.
- Dingus, T., Klauer, S., Neale, V., Petersen, A., Lee, S.E., Sudweeks, J., Perez, M.A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z.R., Jermeland, J., Knippling, R.R., 2006. *The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Endsley, M.R., 1995. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Hum. Factors* 37 (1), 32–64.
- Engström, J.A., Johansson, E., Östlund, J., 2005. Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transp. Res. F: Traffic Psychol. Behav.* 8, 97–120.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., Buchner, A., 2007. G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav. Res. Methods* 39, 175–191.
- Gold, C., Bengler, K., 2014. Taking over control from highly automated vehicles. In: Stanton, N.A., Landry, S., Di Bucchianico, G., Vallicelli, A. (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, pp. 64–69.
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., Bengler, K., 2013. Take over! How long does it take to get the driver back into the loop? *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, 1938–1942.
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., Kochhar, D., Kozak, K., Blommer, M., 2003. Evaluation of driver distraction using an event detection paradigm. *J. Transp. Res. Board* 1843 (1), 1–9.
- Gugerty, L., Rakauskas, M., Brooks, J., 2004. Effects of remote and in-person verbal interactions on verbalization rates and attention to dynamic spatial scenes. *Accid. Anal. Prev.* 36 (6), 1029–1043.
- Horrey, W., Wickens, C., 2007. In-vehicle glance duration: distributions, tails, and model of crash risk. *Transp. Res. Rec.* 2018 (1), 22–28.
- Horrey, W., Lesch, M., Garabet, A., 2009. Dissociation between driving performance and drivers' subjective estimates of performance and workload in dual-task conditions. *J. Safety Res.* 40 (1), 7–12.
- Larsson, A.F., Kircher, K., Hultgren, J.A., 2014. Learning from experience: familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. *Transp. Res. F: Traffic Psychol. Behav.* 27, 229–237.
- Lesch, M.F., Hancock, P.A., 2004. Driving performance during concurrent cell-phone use: are drivers aware of their performance decrements? *Accid. Anal. Prev.* 36 (3), 471–480.
- Llaneras, R., Salinger, J., Green, C., 2013. Human factors issues associated with limited ability autonomous driving systems: drivers' allocation of visual attention to the forward roadway. *Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, 92–98.
- Ma, R., Kaber, D., 2005. Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *Int. J. Ind. Ergon.* 35, 939–953.
- Merat, N., Jamson, A., Lai, F., Carsten, O., 2012. Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54 (5), 762–771.
- Naujoks, F., Mai, C., Neukum, A., 2014. The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions. In: Ahram, T., Karowski, W., Marek, T. (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014*. AHFE Conference, Krakau, pp. 2099–2106.
- Neubauer, C., Matthews, G., Saxby, D., 2012. The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. 56th Annu. Meet.* 56 (No. 1), 1987–1991 (Sage Publications).
- Parasuraman, R., Molloy, R., Singh, I.L., 1993. Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *Int. J. Aviat. Psychol.* 3 (1), 1–23.
- Patel, J., Ball, D.J., Jones, H., 2008. Factors influencing subjective ranking of driver distractions. *Accid. Anal. Prev.* 40 (1), 392–395.
- 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. *Proc. Hum. Factors Ergon. Society Annu. Meet.*, 2063–2067.
- Ruscio, D., Ciceri, M., Blassoni, F., 2015. How does a collision warning system shape driver's brake response time?: The influence of expectancy and automation complacency on real-life emergency braking. *Accid. Anal. Prev.* 77, 72–81.
- SAE International, 2014. Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems (J3016). Retrieved from [http://standards.sae.org/j3016\\_201401/](http://standards.sae.org/j3016_201401/).
- Shinar, D., Tractinsky, N., Compton, R., 2005. Effects of practice, age, and task demands, on interference from a phone task while driving. *Accid. Anal. Prev.* 37 (2), 315–326.
- Stanton, N.A., Young, M., Walker, G., Turner, H., Randle, S., 2001. Automating the driver's control tasks. *Int. J. Cognit. Ergon.* 5 (3), 221–236.
- Wickens, C., 1984. Processing resources in attention. In: Parasuraman, R., Davies, D.R. (Eds.), *Varieties of Attention*. Academic Press, New York, pp. 63–102.
- Young, M., Stanton, N.A., 2002a. Attention and automation: new perspectives on mental underload and performance. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 3 (2), 178–194.
- Young, M., Stanton, N., 2002b. Malleable attentional resources theory: a new explanation for the effects of mental underload on performance. *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 44 (3), 365–375.
- Young, K., Regan, M., Hammer, M., 2003. *Driver Distraction: a Review of the Literature*. Monash University Accident Research Centre, Clayton Vic Australia, pp. 1–52.
- Zeeb, K., Buchner, A., Schrauf, M., 2015. What determines the take-over time?: An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accid. Anal. Prev.* 78, 212–221.
- Zlocki, A., Eckstein, L., 2014. Automated driving-concept and evaluation. 23rd Aachen Colloquium Automob. Engine Technol., 595–612.

**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.**

Kathrin Zeeb<sup>a, c</sup>      *kathrin.zeeb@de.bosch.com*

*phone: +49 7062 911 4398*

Manuela Härtel<sup>b</sup>      *manuela.m.haertel@daimler.com*

Axel Buchner<sup>c</sup>      *axel.buchner@hhu.de*

Michael Schrauf<sup>b, c</sup>      *michael.schrauf@daimler.com*

<sup>a</sup>Robert Bosch GmbH; Systems and Advanced Engineering; Robert-Bosch-Allee 1, D-74232 Abstatt

<sup>b</sup>Daimler AG; Research and Development; Hanns-Klemm-Str. 45, D-71032 Böblingen

<sup>c</sup>Heinrich Heine University Düsseldorf; Department of Experimental Psychology; Universitätsstr. 1, D-40225 Düsseldorf

## **Abstract**

With the ongoing trend towards conditional automation in the automotive industry, it is vital to ensure that drivers are able to resume vehicle control within the given time budget – even when engaging in non-driving related tasks. A driving simulator study was conducted to examine the impact of non-driving related tasks on drivers' ability to take over vehicle control. The task consisted of reading or proofreading a text (low vs. high visual-cognitive task load) on a tablet which was either handheld or mounted in the vehicle (low vs. high manual task load). Data from 95 participants (mean age 38 years, 47 females) were used to examine reaction times and take-over quality in time-critical steering and braking maneuvers.

Manual task load was found to prolong reaction times and to deteriorate take-over quality. Surprisingly, drivers needed even longer for the first gaze at the roadway when holding the tablet in their hands. As expected, these effects were stronger in the steering compared to the braking maneuver. However, even with high manual task load take-over times were on average only slightly longer than 3 s. Effects of cognitive task load were found to be dependent on the type of driver intervention. While reaction times and take-over quality deteriorated with increasing cognitive load in the steering maneuver, hardly any effects were found in the braking maneuver. A possible explanation for this surprising finding could be that especially drivers who are intensively engaging in non-driving related tasks spontaneously react with braking to defuse the situation and gain more time.

It is thus argued that cognitively demanding non-driving related tasks during automated driving do not necessarily lead to deteriorated take-over performance. Depending on situational characteristics like the required reaction or the perceptual complexity of the situation, these might have different effects on the drivers' ability to take over.

*Keywords:* automated driving; conditional automation; driver distraction; driver take-over; driving simulator; non-driving related tasks

## 1. Introduction

In recent years autonomous driving has received a great amount of attention. Currently available driver assistance systems include, for example, Adaptive Cruise Control (ACC) and Lane Keeping Assist, which control either longitudinal or lateral guidance. The next generation of automated systems will fundamentally change the requirements of the driver and the driving task (Flemisch et al. 2012). So-called conditionally automated driving systems provide both longitudinal and lateral vehicle control (SAE International, 2014). While the system is activated, the driver does not have to monitor the system permanently and can be engaged in non-driving related tasks. The willingness to conduct non-driving related tasks was found to increase with higher levels of automation (Carsten et al., 2012; De Winter et al., 2014; Llaneras et al., 2013). In case a system limit is reached, the driver nevertheless serves as a fallback level. A take-over request is issued and the system provides a sufficient (to be defined) time budget within which the driver has to be able to resume control of the vehicle. In order to ensure a safe transition from conditionally automated to manual driving, it is thus vital to examine the impact of non-driving related tasks on driver take-over.

### *1.1 From concurrent to sequential multitasking*

Research has demonstrated the huge impact of driver distraction on road safety during manual driving (e.g., Dingus et al., 2006; Engström et al., 2005; Greenberg et al., 2003; Horrey and Wickens, 2007). It can be assumed that simultaneously executing both the primary driving task and the secondary task leads to the driver's limited cognitive capacities being exceeded (Wickens, 1984). This results in performance decrements in both the driving and the secondary task. In contrast to manual driving, conditional automation relieves the driver entirely of the driving task while the system is activated. The critical aspect is thus no longer the simultaneous execution of multiple tasks, but rather the transition between tasks. This change from a dual to a sequential task paradigm will be elaborated further in the following. In concurrent multitasking, switches between tasks typically occur every few seconds or even more frequently, whereas minutes to hours can lie between a task switch during sequential multitasking (Salvucci et al., 2009). Switching tasks is associated with a so-called switch cost; reactions are often more error-prone and extended after a task switch (Monsell, 2003). This resumption lag (Trafton et al.,

2003) is assumed to be caused by the reconfiguration of cognitive processing modules in order to resume the other task. This may include shifting attention, retrieving task-specific goals and rules, or inhibiting and clearing out a prior task set (Monsell, 2013; Salvucci et al., 2009). Many studies on multitasking use rather simple tasks (e.g., classifying a digit as odd/even, high/low, or a letter as a consonant/vowel; Monsell et al., 2003; Rogers and Monsell, 1995). Resuming control from an automated system is of course a far more complex process, as will be described in the subsequent section.

### *1.2 Driver take-over*

Switching from a non-driving related task to the driving task during automated driving takes varying amounts of time depending on the physical processes (e.g., preparation and execution of the motor processes) and cognitive processes (e.g., perception and mental processing of the situation, action selection; see Zeeb et al., 2015 for a more detailed description) involved. While the latencies due to the cognitive processes are difficult to measure, time to eyes on road and time to hands on steering wheel can be assessed quite readily. Reaction times of about 0.7 to 1 s for the first road fixation, and of about 1.2 to 1.8 s for the first manual contact with the steering wheel have been reported (Gold et al., 2013; Zeeb et al., 2015; Zeeb et al., 2016). Previous research has also highlighted the importance to consider take-over quality when examining driver take-over, as reaction times alone do not provide a comprehensive view (Gold and Bengler, 2014; Zeeb et al., 2016).

Take-over performance was found to be influenced by several factors, such as the given time budget (Gold et al., 2013; Zeeb et al., 2016), the modality of the take-over request (Naujoks et al., 2014), the complexity of the driving situation (Radlmayr et al., 2014), the drivers' strategy of monitoring the roadway (Zeeb et al., 2015), or whether a take-over request is expected (Merat et al., 2014). One of the most important factors when switching from a non-driving related task to the driving task is presumably the non-driving related task itself. There are, however, mixed findings on the effects of non-driving related tasks on drivers' ability to regain vehicle control.

### *1.3 Previous research on non-driving related tasks during automated driving*

Some authors found deteriorated take-over performance, especially take-over quality, due to the engagement in non-driving tasks. Merat et al. (2012) reported that drivers engaging in a quiz game adapted their speed in a critical incident less effectively than drivers without a non-driving related task, even though no differences in response time could be found. Similarly, Zeeb et al. (2016) found deteriorated take-over quality but little impact on reaction times due to the engagement in visual-cognitive non-driving related tasks. Contrary to these findings, however, positive effects of non-driving related tasks were reported in other studies. Neubauer et al. (2012) found shorter braking reaction times after automated driving for drivers using a cell phone as compared to drivers without additional task. The authors assume that an additional task during automated driving can counteract fatigue. Results by Schömig et al. (2015), who used eye lid closure as a measure of driver drowsiness during automated driving, are consistent with that. They found a decreased drowsiness level if drivers engaged in an additional quiz task, assuming that a motivating non-driving related task may enhance alertness.

Thus, findings so far on the impact of drivers' engagement in non-driving related tasks on the resumption of vehicle control do not give a uniform picture. In addition, it seems that the influence of manual task load has not yet received much attention. With the ongoing trend towards smartphones, tablets and other nomadic devices, a closer examination of the effects of manual task load appears essential. Here, examining both a lateral and longitudinal driver intervention seems necessary given that the manual engagement in a non-driving related task might impair the switch to a steering maneuver more (i.e. using arms and hands) than the switch to a braking maneuver (i.e. using legs and feet). Previous research suggests that cognitive-visual task load might affect braking and steering differently as well. Louw et al. (2015) report that drivers with additional task reacted more often with steering and braking and less often with steering only compared to drivers without additional task during automated driving. Gold et al. (2013) compared the reaction type of drivers with 5 versus 7 s time budget before reaching a system limit while automated driving. It was found that drivers with a short time budget reacted more often with braking and less often with steering only compared to drivers with a longer time budget. The authors suggest that braking is used if drivers need more time for decision making. If this were the case, then it could be assumed that non-driving related task engagement might affect take-over performance in lateral and longitudinal driver interventions differently. Hence, for a closer examination of the impact of non-

driving related task engagement on driver take-over, a systematic variation of task load and driver intervention is required.

#### *1.4 Objectives of the present study*

The aim of the present study was to examine the impact of non-driving related tasks on take-over performance in time-critical situations. In particular, the goal was to measure the effects of low vs. high manual and cognitive task load on take-over time and quality. It was expected that a high cognitive demand extends the time it takes for the driver to make an intervention in vehicle control and also deteriorates take-over quality. The first glance at the road and the first contact with the steering wheel, however, seem to be more reflexive actions (Zeeb et al., 2015; Zeeb et al., 2016) and should thus not be affected by the driver's cognitive load. High manual task demand, on the other hand, was assumed to prolong the first contact with the steering wheel. This is expected to result in a delayed driver intervention and deteriorated vehicle stabilization after taking over. Further, the possible interaction of task demands and the required driver action (lateral vs. longitudinal intervention) was of interest. Specifically, high manual load was expected to affect steering more than braking. For cognitive load, however, no interaction with the type of scenario was assumed.

## **2. Method**

### *2.1 Participants*

The sample consisted of 112 participants who were selected from a Daimler AG database of volunteers. Requirements were normal or corrected-to-normal vision and a valid driver's license. Data from 17 participants had to be excluded from statistical analysis due to technical problems ( $n = 10$ ), participants not appearing for the test ( $n = 3$ ), participants not following the instructions ( $n = 3$ ), or motion sickness ( $n = 1$ ). Consequently, data from 95 participants (54 internal employees, 41 external) were available for analysis. The main demographic features of the sample are presented in Table 1. Of the participants, 17% were at or below secondary school level, 29% held a German diploma qualifying for university admission, and 54% had a university degree. Participants were matched for age and gender when assigned to one of the ten experimental groups (further explained in Table 2). No statistically significant

differences were found among the groups with respect to demographic features. Participants received 30€ for participating and were free to terminate the study at any time without penalty. Data were collected anonymously.

**Table 1.** Demographic features distributed across the different experimental groups (see the main text for details). Absolute or relative numbers of participants are given for gender, mileage in the past year and prior experience with assistance systems. Means and standard deviations (in round brackets) as well as 95% confidence intervals (CI; in square brackets) are given for age and years of holding a valid driver’s license. The variables were tested for differences among the groups using ANOVAs (age and possession of driver’s license), Kruskal-Wallis test for ordinal data (mileage), and  $\chi^2$  tests for categorical data (gender and experience with assistance systems).

Group	Gender ( $n_{\text{female}} / n_{\text{male}}$ )	Age (years)	Driver’s license held (years)	Mileage (1.000 km/year)				Drivers having used assistance systems before (%)		
				< 5 (%)	5-10 (%)	10-20 (%)	> 20 (%)	cruise control	adaptive cruise control	active lane keeping
1	5/4	38.6 (10.5) [31.7, 45.4]	23.1 (13.0) [14.6, 31.7]	0	22	22	56	100	56	56
2	3/7	44.1 (10.1) [37.8, 50.4]	26 (9.7) [20.0, 32.0]	0	10	60	30	90	30	40
3	6/4	31.9 (10.8) [25.2, 38.6]	13.6 (9.5) [7.7, 19.5]	0	10	40	50	90	40	40
4	5/5	34.3 (8.6) [28.9, 39.7]	17.1 (8.9) [11.6, 22.6]	0	10	70	20	70	70	60
5	4/7	44.2 (10.3) [38.1, 50.3]	25.4 (9.8) [19.6, 31.2]	0	0	55	45	82	27	27
6	4/5	36.3 (11.1) [29.1, 43.6]	19.0 (11.0) [11.8, 26.2]	0	45	33	22	89	33	33
7	6/5	39.9 (11.7) [33.0, 46.8]	22.3 (12.4) [14.9, 29.6]	9	18	27	46	91	45	27
8	6/3	42.6 (9.2) [36.6, 48.5]	22.2 (9.4) [16.1, 28.3]	0	11	67	22	89	33	44
9	4/4	32.6 (9.2) [26.3, 39.0]	14.9 (9.2) [8.5, 21.3]	0	12	63	25	100	75	75
10	4/4	36.3 (11.8) [28.1, 44.5]	17.9 (11.1) [10.2, 25.5]	0	37	50	13	100	50	50
Total	47/48	38.3 (10.8)	20.3 (10.8)	1	17	48	34	89	46	44
<i>p</i> -value	.90	.07	.12			.46		.95	.63	.68

## 2.2 Driving simulator

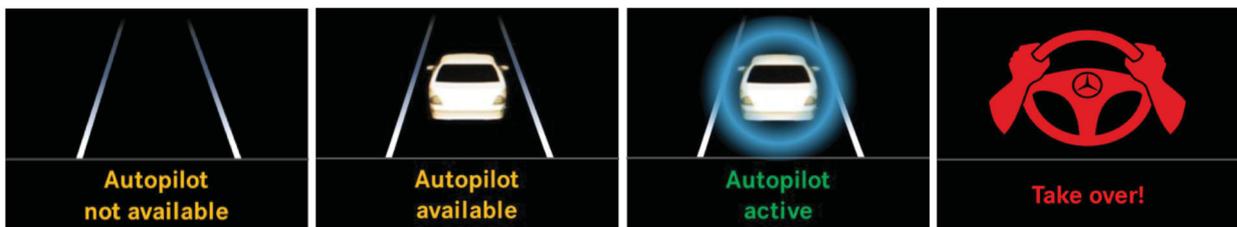
The experiment was conducted in the dynamic Mercedes-Benz driving simulator in Sindelfingen, Germany. The simulator consists of a dome in which an E-Class sedan (W212) was placed. Eight LCOS projectors are used for the 360° screen surrounding the vehicle. The dome rests on a moveable hexapod, which is mounted on a 12 m long rail (Figure 1). Participants’ behavior was recorded through three cameras attached inside of the vehicle.



**Figure 1.** Mercedes-Benz driving simulator (left) and an example of the inside of the simulator cell with a C-Class (right).

### 2.3 Conditionally automated driving system

The implemented automated system controlled longitudinal and lateral vehicle guidance on the highway. The requirements for the system to work were detectable lane markings. If these were available, the system could be activated by the driver by pulling the lever usually used for cruise control on the left side of the steering wheel. The system status was displayed in a separate display to the left of the steering wheel (Figure 4, left). The system drove with a preset velocity of 130 km/h (about 80 mph) in the rightmost lane. In case of a slower leading vehicle, the system automatically overtook, if possible, or adjusted the speed accordingly. If the activated system reached a situation it could not handle, a take-over request was issued and the driver had 3.5 s before the system deactivated itself. The take-over request consisted of an auditory warning (“Please take over!”) and a red steering wheel icon, which was displayed in the system status display and the tablet used for non-driving related tasks (Figure 2). The driver could deactivate the system either by pulling the lever again, or by braking or steering. The system detected a braking intervention when the standardized brake pedal travel was larger than 5%. Similarly a steering input was detected by a steering torque larger than 0.7 Nm and a steering torque gradient larger than 0.9 Nm/s.



**Figure 2.** Displays of the system states (from left to right): system not available, system available but not yet activated, system activated, take-over request due to detected system boundary.

## *2.4 Instructions*

Upon arrival, participants signed consent forms and completed a demographic questionnaire. Subsequently, they received information about the automated system, the non-driving related tasks and the test drive. This included information on how to activate and deactivate the system, and that the system would control braking and steering, as well as overtake slower vehicles. Participants were informed that there are situations the system cannot handle such as ending lane markings, in which case a visual and auditory take-over request would be prompted and they would have a few seconds to regain vehicle control. They were further instructed to engage in non-driving related tasks presented on a tablet while the conditionally automated system was active. Four training tasks were performed on a tablet to become familiar with the custom-designed multimedia system into which the tasks were integrated. This part was left out for the drivers of the control group, who did not perform any non-driving related tasks during the drive. Finally, individual participants were seated in the car.

## *2.5 Test drive*

The whole test drive took place on a three-lane highway with a total duration of about 30 min (about 65 km/40 miles). There was moderate surrounding traffic throughout the whole drive. The drive started with a 13 min training drive to acquaint drivers with the driving simulator, the automated system, and the take-over request. This included about 5:30 min of manual driving, followed by 2:30 min of automated driving without non-driving related task and 5 min of automated driving with a non-driving related task. Subsequently, the vehicle reached a segment with faded lane markings and the system issued a take-over request. This situation was designed so that even without a driver intervention, no accident could occur. It was implemented so that the drivers became accustomed to the take-over request and it was not included in any analysis. Subsequently, drivers were instructed to reactivate the system, continue with the next task, and the actual test drive started. The order of the following two take-over situations was balanced, with half of the drivers experiencing the steering, and the other half experiencing the braking maneuver first.

### 2.5.1 Lateral driver intervention

Participants drove in automated mode while engaging in non-driving related tasks for about 7:45 min before they reached a segment with faded lane markings and a take-over request was issued. This happened in a curve to the left, while at the same time a wind gust from the left side with a velocity of 7 m/s was triggered for 7 s. The vehicle therefore drifted off towards the shoulder on the right side, forcing the drivers to react with a steering intervention to keep the vehicle in the lane (Figure 3, top). After the wind stopped and the drivers reactivated the automated system, they were asked by the experimenter how alert they felt (from 1 – *not at all* to 6 – *very alert*), and how mentally demanding they had perceived the last minutes before taking over (from 1 – *not at all* to 6 – *very demanding*). Depending on the order of the lateral and longitudinal maneuver, the drivers were afterwards either asked to continue with the next non-driving related task or to stop on the shoulder if the drive was concluded.



**Figure 3.** Top: The ego-vehicle drifting off the lane in the lateral take-over situation. Bottom: The ego-vehicle braking due to the sudden lane change and deceleration of the white vehicle in the longitudinal take-over situation.

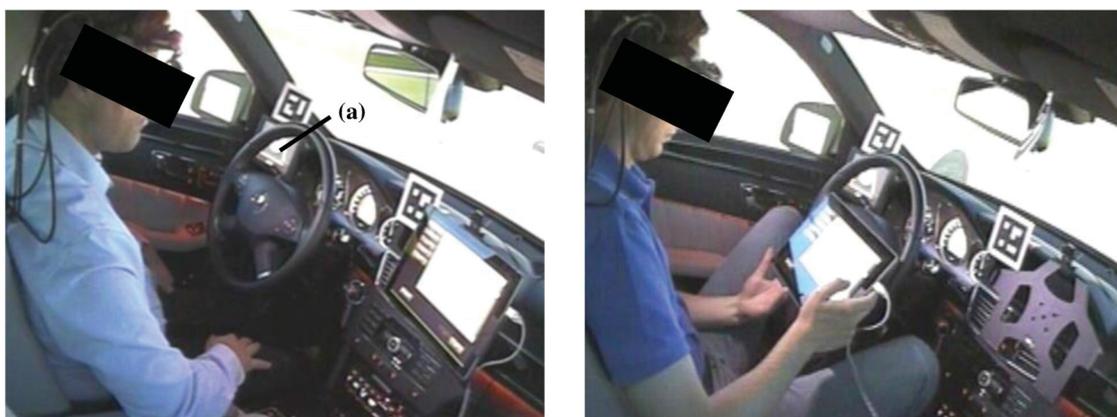
### 2.5.2 Longitudinal driver intervention

Before reaching the longitudinal maneuver, participants drove in automated mode for about 7:30 min. The ego-vehicle reached another segment with missing lane markings and a take-over request was prompted. Immediately thereafter, another vehicle in the center lane about 20 m in front of the driver

started signaling right, indicating a lane change into the ego-lane. By the time the signaling vehicle was more than half on the ego-lane and thus detectable by the automated system, the time budget of 3.5 s had elapsed. The system was deactivated, even if there had been no driver intervention within the time budget. While cutting in, the signaling vehicle started braking from 126 km/h to 80 km/h with a deceleration of  $-10.2 \text{ m/s}^2$  for 4.5 s. Hence, drivers had to react with a hard braking intervention to avoid a collision (Figure 3, bottom). Afterwards, the leading vehicle accelerated and drove away. When lane markings were detectable again, drivers reactivated the automated system and were asked to rate their alertness and the perceived mental demands. Depending on the order of the lateral and longitudinal maneuver, drivers subsequently either continued with the next task or were asked to stop on the shoulder if the drive was concluded.

### 2.6 Non-driving related tasks

All non-driving related tasks were integrated in a custom-designed multimedia system and displayed on a 12" tablet (Windows Surface Pro 3). One group of drivers had the tablet mounted on the center console. Another group held the tablet in their hands (Figure 4); participants in that group were not instructed on where to put the tablet when having to resume vehicle control.



**Figure 4.** Drivers engaging in non-driving related tasks in the *mounted* (left) and *handheld* condition (right). (a) indicates the system status display.

The tasks were describe in a separate *task* menu and consisted of watching video clips, listening to music, and reading news texts. They were provided in a fixed order, so that drivers were engaging in the same tasks in the take-over situations. The tasks consisted of reading scientific news texts, which required no specific knowledge about the topic (one article about artificial intelligence, and one about a

boy having Asperger's syndrome). With about 2.500 words each the texts were so long that the participants could not finish them within the given time interval. In order to prevent drivers from losing interest in the reading task, there was an additional music or video task included before the reading tasks. In both take-over situations drivers had been working on the reading task for about 4 to 5 min by the time the take-over request was triggered.

### *2.6.1 Variation of cognitive task difficulty*

The cognitive difficulty of the two reading tasks was varied. The easy task was to read the text without any further instructions. The difficult task was to read the text and find inserted spelling errors. Previous research found increased cognitive processing during proofreading compared to reading for comprehension. This was indicated by longer gaze durations and total fixation times, as well as more corrective saccades (Daneman et al., 1995; Kaakinen & Hyönä, 2010). Reading versus proofreading seems thus a valid operationalization of different levels of cognitive task difficulty. Participants were instructed to read out loud the mistakes they found, so that the experimenter could check whether the task was executed correctly. In order to consider different levels of literacy skills, there were mistakes included which were easy (e.g., inserted symbols: "stude+nt"), moderate (e.g., letter transpositions: "shelationrip"), and more difficult to find (e.g., missing letters: "psychologist"). Additionally, an influence of educational level on subjective task demands was tested (see Section 3.2). There was on average about one mistake per 25 words. The order of the easy and difficult task was counterbalanced, so that one half of the drivers was working on the easy task during the time preceding the lateral maneuver and on the difficult task during the time preceding the longitudinal maneuver, and vice versa for the other half.

### *2.7 Experimental design*

In addition to the manipulation of the tablet position (mounted vs. handheld), scenario (lateral vs. longitudinal), and cognitive task difficulty (easy vs. difficult), a control group of drivers not engaging in non-driving related tasks was included in order to further examine the influence of each of these

factors compared to a baseline group. Taking into account the counterbalancing, there were thus ten different experimental groups. An overview is provided in Table 2.

**Table 2.** Overview of the different experimental groups with the number of initially assigned and remaining participants after drop-outs were excluded. Groups 9 and 10 contain the drivers of the control group, who did not conduct any non-driving related tasks.

Group	Tablet position	Take-over situation 2		Take-over situation 3		<i>n</i> (actual / planned)
		Scenario	Task difficulty	Scenario	Task difficulty	
1	mounted	lateral	easy	longitudinal	difficult	9 / 12
2	mounted	lateral	difficult	longitudinal	easy	10 / 11
3	mounted	longitudinal	easy	lateral	difficult	10 / 11
4	mounted	longitudinal	difficult	lateral	easy	10 / 12
5	handheld	lateral	easy	longitudinal	difficult	11 / 12
6	handheld	lateral	difficult	longitudinal	easy	9 / 11
7	handheld	longitudinal	easy	lateral	difficult	11 / 11
8	handheld	longitudinal	difficult	lateral	easy	9 / 12
9	-	lateral	-	longitudinal	-	8 / 10
10	-	longitudinal	-	lateral	-	8 / 10
All						95 / 112

Scenario order was not included as an additional factor in the design, as this would have reduced the sample sizes too much for a sensitive statistical analysis. Possible sequence effects were, however, examined in Section 3.3. Thus, the central design of the study was a 2x2 factorial design with *tablet position* (*mounted* vs. *handheld*) and *cognitive task difficulty* (*easy* vs. *difficult*) as between-subjects factors, complemented by a control group. This design was applied to both take-over situations (lateral and longitudinal maneuver). Table 3 contains the number of participants for each cell in the design. Based on these figures, a sensitivity analysis showed that given  $\alpha = \beta = .05$  effects of size  $f = 0.41$  could be detected for between subjects comparisons such as mounted vs. handheld tablet position (Faul et al., 2007). Whenever not all data points were available for analysis, the sensitivities were correspondingly lower.

**Table 3.** Number of participants included in the analysis of both scenarios for the factors *tablet* and *task difficulty*, and the additional control group.

Scenario	Tablet position	Lateral			Longitudinal		
		Control group	Mounted	Handheld	Control group	Mounted	Handheld
Task difficulty	None	16			16		
	Easy		21	20		20	19
	Difficult		19	19		20	20

### 2.7.1 Dependent variables

An overview of the dependent variables recorded in the take-over situations is provided in Table 4. The following reaction times after the take-over request were recorded and analyzed: (1) the time the driver needed for the first gaze at the road (*time to eyes on*), (2) the time for the first contact with the steering wheel (*time to hands on*), and (3) the time it takes the driver to start a steering or braking intervention. The latter depended on the scenario (*first steering* in the lateral maneuver, *first braking* in the longitudinal maneuver). *Time to eyes on* and *time to hands on* were labeled two times by two different raters using the interior cameras. Inter-rater reliabilities were considered sufficiently high (lateral maneuver:  $r_{eyes\ on} = .93$ ,  $p_{eyes\ on} \leq .001$ ;  $r_{hands\ on} = .99$ ,  $p_{hands\ on} \leq .001$ ; longitudinal maneuver:  $r_{eyes\ on} = .82$ ,  $p_{eyes\ on} \leq .001$ ;  $r_{hands\ on} = .98$ ,  $p_{hands\ on} \leq .001$ ). The average of both ratings was used for the analysis. *Time to eyes on* could not be collected for the control group, as most of the drivers without non-driving related task were looking at the roadway even before the take-over request.

Scenario-specific measures of take-over quality had to be defined. In the lateral maneuver, the 7 s time period after the take-over request during which the wind gust was active was analyzed. The variables in the longitudinal maneuver refer to the 6 s after the take-over request during which the leading vehicle was decelerating. In both situations, the drivers' reaction type was categorized according to whether the drivers reacted with steering only, braking only, or steering and braking.

**Table 4.** Dependent variables recorded in the take-over situations.

Reaction times	Description
<i>Time to eyes on (s)</i>	First gaze at road (video labeling)
<i>Time to hands on (s)</i>	First contact with steering wheel (video labeling)
<i>Time to driver intervention (s)</i>	Steering: steering wheel angle velocity $\geq 10$ °/s Braking: standardized brake pedal travel $\geq 10\%$
Take-over quality	
<i>Reaction type</i>	Steering only, braking only, steering and braking
Lateral maneuver	
<i>Max. deviation from lane center (m)</i>	Max. deviation of the ego-vehicle from the center of the ego-lane in 7s after take-over request
<i>Min. tlc (s)</i>	Min. time to lane crossing (as measured by half of the ego-vehicle crossing the lane marking) in 7s after take-over request
Longitudinal maneuver	
<i>Min. distance (m)</i>	Min. distance to leading vehicle in 6 s after take-over request
<i>Min. time gap (s)</i>	Min. time gap to leading vehicle in 6 s after take-over request

### 3. Results

#### 3.1 Data analysis

First, some general analyses were conducted. These included a manipulation check by examining subjective ratings of task difficulty (Section 3.2), and an examination of possible sequence effects (Section 3.3). For the main analysis of manual and cognitive task difficulty, univariate ANOVAs with Bonferroni-Holm correction of the pairwise comparisons (cf. Holm, 1979) were carried out for *tablet position* and *cognitive task difficulty* (Sections 3.4 and 3.5). Levene's test was used to test the assumption of homogeneity of variances. In case this assumption was violated, the Games Howell post hoc test was used. This was done separately for the two take-over scenarios (lateral and longitudinal maneuver). Eta-squared ( $\eta^2$ ) and Cohen's  $d$  are reported as measures of the sample effect size. According to Cohen (1988), effect sizes will be interpreted as small for  $\eta^2 \geq 0.01$  and  $d \geq 0.2$ , as medium for  $\eta^2 \geq 0.06$  and  $d \geq 0.5$  and as large for  $\eta^2 \geq 0.14$  and  $d \geq 0.8$ .

In the longitudinal scenario, 10 drivers conducted a lane change to overtake the vehicle cutting in. These drivers were excluded from the analysis of the longitudinal maneuver, as their behavior was not comparable to the other drivers' reaction (e.g. measures of take-over quality could not be applied).

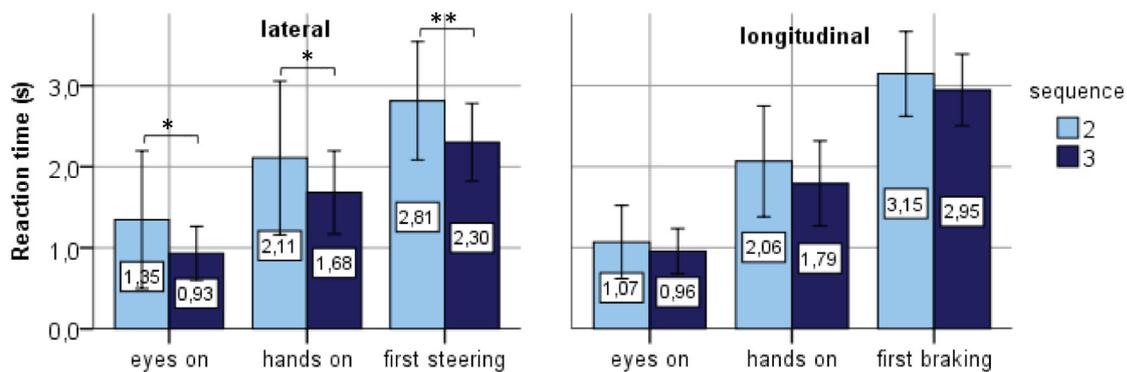
#### 3.2 Subjective ratings of driving and non-driving related task demands

There was a significant influence of *cognitive task difficulty* on the subjective rating of mental task load, which was assessed immediately after each take-over situation ( $F(2, 182) = 87.81$ ;  $p \leq .001$ ;  $\eta^2 = .49$ ). Drivers without a non-driving related task rated mental load the lowest ( $M = 1.45$ ,  $SD = 0.62$ , 95% CI [1.22, 1.68]), followed by drivers with the easy task ( $M = 3.56$ ,  $SD = 1.28$ , 95% CI [3.27, 3.85]), and the drivers with the difficult task ( $M = 4.52$ ,  $SD = 1.02$ , 95% CI [4.29, 4.75]). All pairwise comparisons reached statistical significance ( $p \leq .001$  for all post-hoc tests;  $d_{\text{no task-easy}} = 1.86$ ,  $d_{\text{no task-difficult}} = 3.32$ ,  $d_{\text{easy-difficult}} = 0.83$ ). There was no influence of drivers' educational level (below secondary school level vs. qualified for university admission vs. university degree; Section 2.1) on mental task load ratings, neither for the easy task ( $F(2, 74) = 0.78$ ;  $p = .46$ ;  $\eta^2 = .02$ ), nor for the difficult task ( $F(2, 74) = 1.10$ ;  $p = .34$ ;  $\eta^2 = .03$ ).

*Cognitive task difficulty* was furthermore found to affect the subjective ratings of alertness ( $F(2, 182) = 26.58; p \leq .001; \eta^2 = .23$ ). Drivers without non-driving related tasks rated their alertness significantly lower ( $M = 3.10, SD = 1.14, 95\% CI [2.68, 3.51]$ ) than both drivers with an easy task ( $M = 4.58, SD = 1.21, 95\% CI [4.31, 4.86], p \leq .001, d = 1.24$ ) and drivers with a difficult task ( $M = 4.86, SD = 1.11, 95\% CI [4.61, 5.11], p \leq .001, d = 1.57$ ). No difference was found between drivers with an easy and a difficult task ( $p = .15, d = 0.20$ ).

### 3.3 Sequence effects

Despite the first take-over situation to reduce learning effects, there was still a sequence effect on reaction times ( $F(3, 59) = 7.19; p \leq .001; \eta^2 = .27$ ). Drivers had shorter *time to eyes on* ( $F(1, 61) = 9.11; p = .004; \eta^2 = .13$ ), *time to hands on* ( $F(1, 61) = 19.07; p \leq .001; \eta^2 = .24$ ), and *time to driver intervention* ( $F(1, 61) = 12.27; p \leq .001; \eta^2 = .17$ ) in the third compared to the second scenario. When examining the two scenarios separately, however, sequence effects were only found in the lateral maneuver ( $F(3, 66) = 5.28; p = .003; \eta^2 = .19$ ; Figure 5). Here, differences existed in *time to eyes on* ( $F(1, 68) = 6.15; p = .016; \eta^2 = .08$ ), *time to hands on* ( $F(1, 68) = 4.24; p = .043; \eta^2 = .06$ ), and *time to first steering* ( $F(1, 68) = 9.13; p = .004; \eta^2 = .12$ ). In the longitudinal maneuver, no statistically significant sequence effects were found ( $F(3, 65) = 0.87; p = .46; \eta^2 = .04$ ).



**Figure 5.** Sequence effects on reaction times for the two scenarios separately, means with standard deviation as error bars. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

### 3.4 Influence of manual task load on driver take-over performance

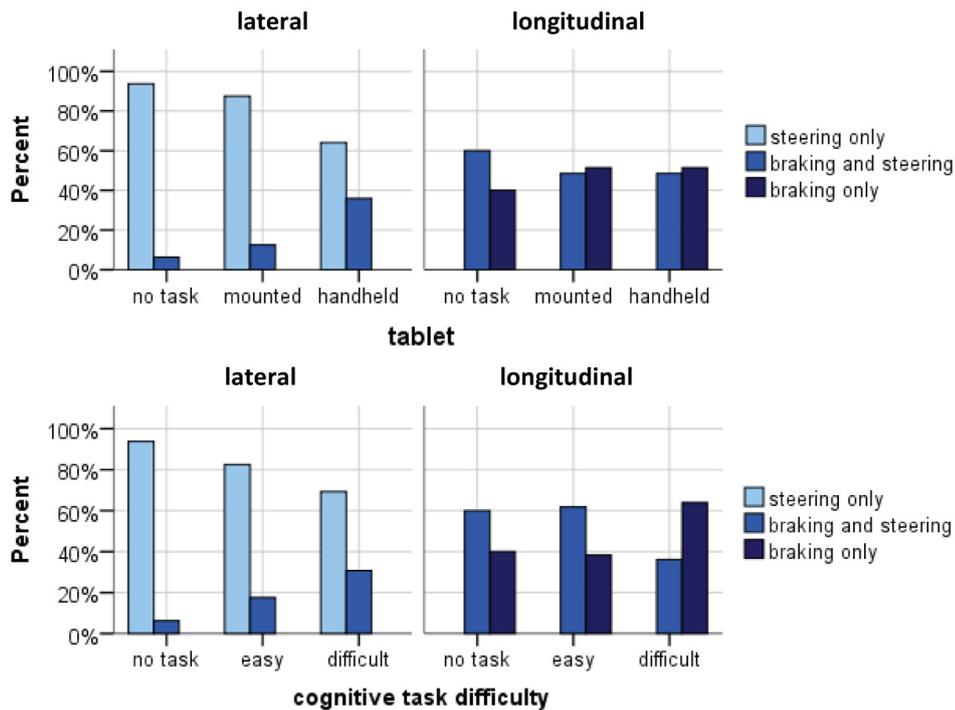
#### 3.4.1 Lateral driver intervention

A one-way ANOVA revealed a significant influence of tablet position (i.e., manual load) on *time to eyes on* ( $F(1, 68) = 5.60; p = .02; \eta^2 = .08$ ), *time to hands on* ( $F(2, 92) = 18.33; p \leq .001; \eta^2 = .29$ ), and *time to first steering* ( $F(2, 92) = 15.86; p \leq .001; \eta^2 = .26$ ). Pairwise comparisons showed that all reaction time variables were significantly longer for drivers of the *handheld* group compared to drivers of both the *mounted* and the control group. Additionally, drivers of the *mounted* group needed longer for a steering intervention than drivers of the control group (Table 5; Figure 7, left).

**Table 5.** Pairwise comparisons on the influence of manual task load on reaction time variables and measures of take-over quality in the lateral and longitudinal maneuver, means with standard deviations (in round brackets) and 95% CIs (in square brackets).

Variable	Group means			<i>p</i> -value   Cohen's <i>d</i>			
	Control group	Mounted	Handheld	Control vs. mounted	Control vs. handheld	Mounted vs. handheld	
Lateral	Eyes on (s)	-	0.95 (0.33) [0.84, 1.07]	1.32 (0.86) [1.03, 1.62]	-	-	.02   0.57
	Hands on (s)	1.17 (0.48) [0.92, 1.43]	1.48 (0.37) [1.36, 1.60]	2.19 (0.90) [1.90, 2.48]	.08   0.77	$\leq .001$   1.27	$\leq .001$   1.04
	First steering (s)	1.98 (0.36) [1.79, 2.17]	2.25 (0.44) [2.11, 2.39]	2.80 (0.71) [2.57, 3.03]	.03   0.64	$\leq .001$   1.30	$\leq .001$   0.93
	Max. lane deviation (m)	0.83 (0.20) [0.72, 0.93]	0.97 (0.30) [0.87, 1.06]	1.37 (0.54) [1.19, 1.54]	.13   0.51	$\leq .001$   1.15	$\leq .001$   0.92
	Min. tlc (s)	2.15 (0.35) [1.96, 2.33]	1.90 (0.45) [1.76, 2.05]	1.31 (0.64) [1.10, 1.51]	.09   0.59	$\leq .001$   1.47	$\leq .001$   1.07
Longitudinal	Eyes on (s)	-	0.88 (0.32) [0.76, 1.00]	1.14 (0.38) [1.00, 1.29]	-	-	.005   0.74
	Hands on (s)	1.55 (0.54) [1.23, 1.88]	1.58 (0.46) [1.42, 1.74]	2.20 (0.55) [2.01, 2.39]	.87   0.06	$\leq .001$   1.19	$\leq .001$   1.22
	First braking (s)	2.83 (0.39) [2.61, 3.04]	2.91 (0.41) [2.77, 3.05]	3.13 (0.52) [2.96, 3.31]	1.00   0.20	.10   0.62	.12   0.47
	Min. distance (m)	11.08 (4.14) [8.79, 13.37]	10.95 (4.19) [9.51, 12.39]	8.47 (4.58) [6.89, 10.04]	.92   0.03	.13   0.59	.06   0.57
	Min. time gap (s)	0.44 (0.14) [0.36, 0.52]	0.43 (0.14) [0.39, 0.48]	0.34 (0.17) [0.37, 0.43]	.83   0.07	.10   0.62	.05   0.58

Regarding take-over quality, there were differences among the driver groups in *max. lane deviation* ( $F(2, 92) = 14.44; p \leq .001; \eta^2 = .24$ ) and *min. tlc* ( $F(2, 92) = 19.76; p \leq .001; \eta^2 = .30$ ). The *handheld* group was found to have a larger lane deviation and shorter tlc than the other driver groups. The driver groups furthermore differed in reaction type ( $\chi^2(2) = 9.04; p = .01$ ; Cramer's  $V = .31$ ). Drivers of the control group reacted more often with steering only (94%) and less often with steering and braking (6%), than drivers of the *mounted* (87% steering only; 13% steering and braking) and *handheld* condition (64% steering only; 36% steering and braking; see Figure 6, top left).

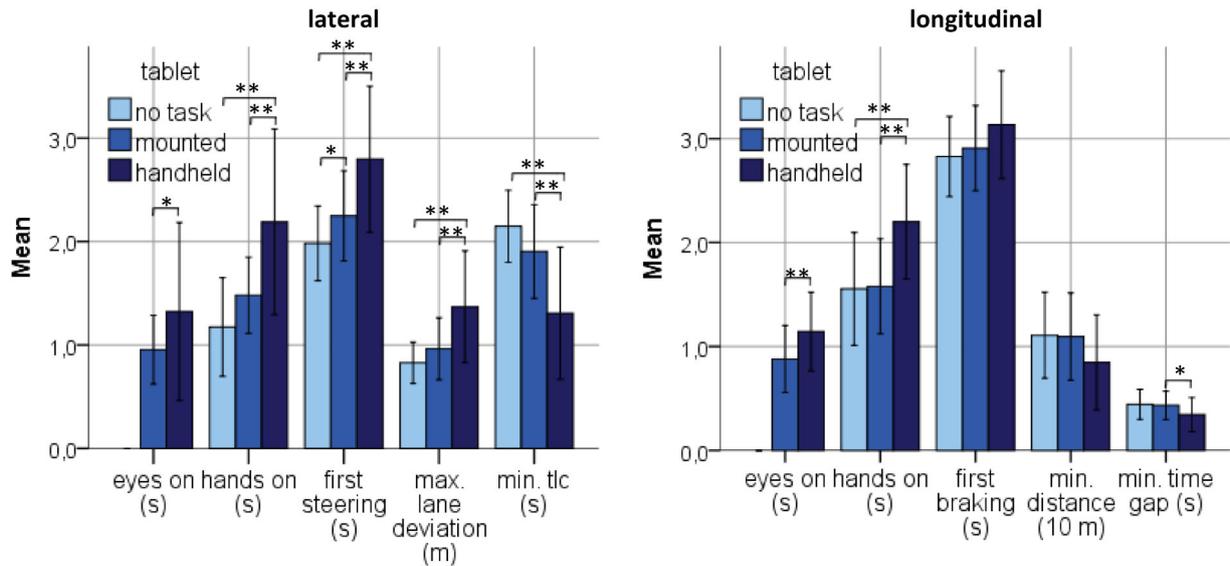


**Figure 6.** Reaction type frequency for the different *tablet position* (top) and *cognitive task difficulty* conditions (bottom). Please note that ten drivers who reacted with a lane change in the longitudinal maneuver were excluded from the analysis (see Section 3.1).

### 3.4.2 Longitudinal driver intervention

Similarly to the lateral maneuver, there was an influence of manual load found on *time to eyes on* ( $F(1, 59) = 8.67$ ;  $p = .005$ ;  $\eta^2 = .12$ ), *time to hands on* ( $F(2, 80) = 15.28$ ;  $p \leq .001$ ;  $\eta^2 = .31$ ), and *time to first braking* ( $F(2, 82) = 3.29$ ;  $p = .04$ ;  $\eta^2 = .08$ ). Again, the *handheld* group showed longer *time to eyes on* and *time to hands on* compared to the *mounted* and control group (Table 5; Figure 7, right). However, none of the pairwise comparisons of *time to first braking* reached statistical significance.

There were also differences among the driver groups in the min. distance to the vehicle ( $F(2, 82) = 3.46$ ;  $p = .04$ ;  $\eta^2 = .07$ ), and the min. time gap ( $F(2, 82) = 3.94$ ;  $p \leq .02$ ;  $\eta^2 = .07$ ). Post-hoc test revealed only one significant effect: Drivers of the *handheld* condition had a shorter time gap compared to the *mounted* group. No difference could be found in reaction type ( $\chi^2(2) = 0.72$ ;  $p = .72$ ). Drivers of the different groups reacted about equally often with braking only (control group: 40%; *mounted*: 51%; *handheld*: 49%), and braking and steering (Figure 6, top right).



**Figure 7.** Reaction times and measures of take-over quality in the lateral (left) and longitudinal maneuver (right) for driver groups with different manual task load, means with standard deviations as error bars. *min. distance* was divided by ten for a better presentation. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

### 3.4.3 Handling of the tablet in the take-over situations

In order to further examine how drivers of the *handheld* condition dealt with the tablet in the take-over situations, they were categorized via video labeling. It turned out that drivers mainly used one of three different strategies: Putting the tablet aside first and then taking over, putting the tablet aside while taking over, or taking over first and then putting the tablet aside. Drivers applying the first strategy on average showed the longest reaction times and the most deteriorated take-over quality (Table 6). Because the number of drivers per group was too different, with only four drivers in one group, no further statistical analysis was conducted.

**Table 6.** Reaction times and measure of take-over quality in the lateral and longitudinal maneuver for drivers of the *handheld* condition.

	Variable	Tablet aside then take-over	Tablet aside while taking over	Take-over then tablet aside
Lateral	<i>n</i> (%)	12 (31%)	23 (59%)	4 (10%)
	Eyes on (s)	2.04 (1.15)	0.92 (0.22)	1.22 (0.40)
	Hands on (s)	3.03 (1.07)	1.85 (0.47)	1.64 (0.52)
	First steering (s)	3.43 (0.81)	2.54 (0.44)	2.38 (0.37)
	Max. lane deviation (m)	1.83 (0.68)	1.16 (0.29)	1.21 (0.39)
	Min. tlc (s)	0.75 (0.65)	1.51 (0.45)	1.84 (0.48)
	Longitudinal	<i>n</i> (%)	11 (31%)	20 (57%)
Eyes on (s)		1.37 (0.47)	0.99 (0.24)	1.12 (0.28)
Hands on (s)		2.60 (0.51)	2.03 (0.49)	1.95 (0.44)
First braking (s)		3.55 (0.35)	2.91 (0.50)	3.14 (0.32)
Min. distance (m)		5.77 (3.84)	10.34 (4.53)	6.52 (1.84)
Min. time gap (s)		0.24 (0.15)	0.41 (0.16)	0.28 (0.08)

### 3.5 Influence of cognitive task load on driver take-over performance

#### 3.5.1 Lateral driver intervention

In the lateral maneuver, a significant influence of cognitive task load could be found on *time to hands on* ( $F(2, 92) = 8.30; p \leq .001; \eta^2 = .15$ ) and *time to first steering* ( $F(2, 92) = 7.37; p \leq .001; \eta^2 = .13$ ), but not on *time to eyes on* ( $F(1, 68) = 0.93; p = .34; \eta^2 = .01$ ). Pairwise comparisons showed that drivers with an easy and a difficult non-driving related task needed more time for the first contact with the steering wheel and for the first steering intervention than drivers of the control group (Table 7; Figure 8, left). No differences were found between drivers with an easy and a difficult task.

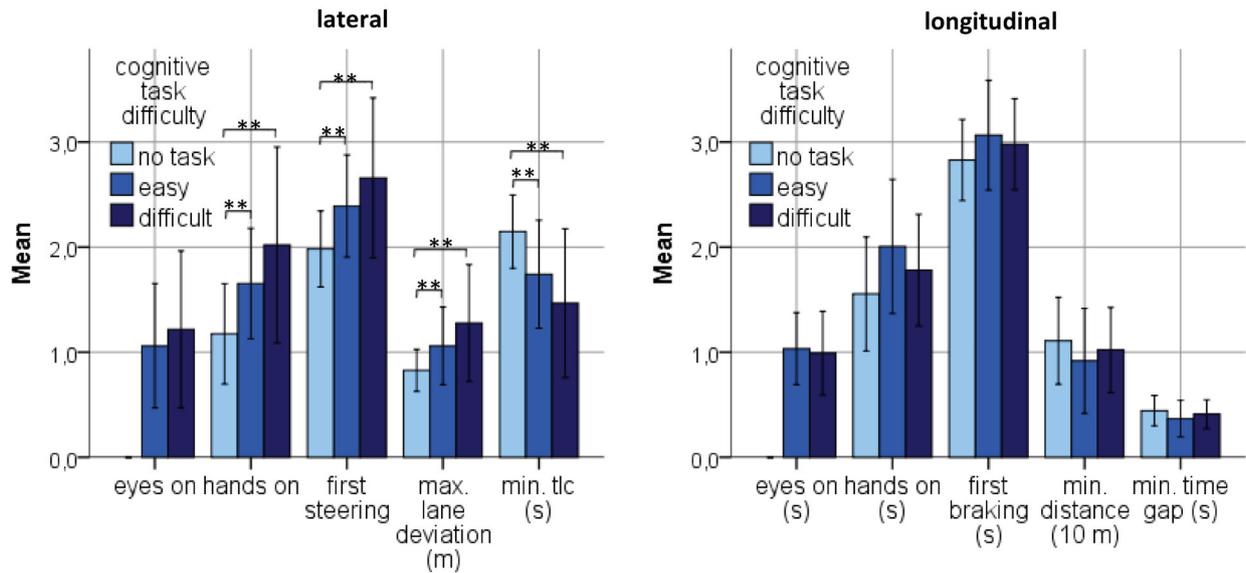
There was also an effect of cognitive task load on *max. lane deviation* ( $F(2, 92) = 6.42; p = .002; \eta^2 = .12$ ) and *min. tlc* ( $F(2, 92) = 7.92; p \leq .001; \eta^2 = .14$ ). Again, drivers with an easy and a difficult task showed a larger lane deviation and shorter tlc compared to drivers of the control group. Reaction type was not influenced significantly by task load ( $\chi^2(2) = 5.03; p = .08$ ). Driver groups reacted in about equal shares with steering only (control group: 94%; *easy task*: 83%; *difficult task*: 68%), and steering and braking (Figure 6, bottom left).

**Table 7.** Pairwise comparisons on the influence of cognitive task load on reaction times and measures of take-over quality in the lateral and longitudinal maneuver, means with standard deviations (in round brackets) and 95% CIs (in square brackets). ‘n.s.’ indicates a non-significant  $F$ -test, in which case no post-hoc tests were performed.

Variable	Group means			$p$ -value   Cohen's $d$			
	Control group	Easy task	Difficult task	Control vs. easy	Control vs. difficult	Easy vs. difficult	
Lateral	Eyes on (s)	-	1.06 (0.59) [0.85, 1.27]	1.21 (0.75) [0.96, 1.46]	-	-	n.s.
	Hands on (s)	1.17 (0.48) [0.92, 1.43]	1.65 (0.53) [1.49, 1.83]	2.02 (0.93) [1.71, 2.31]	.007   0.93	≤ .001   1.03	.09   0.49
	First steering (s)	1.98 (0.36) [1.79, 2.17]	2.39 (0.49) [2.24, 2.55]	2.66 (0.76) [2.40, 2.89]	.004   0.90	≤ .001   1.01	.16   0.42
	Max. lane deviation (m)	0.83 (0.20) [0.72, 0.93]	1.06 (0.37) [0.94, 1.18]	1.28 (0.56) [1.09, 1.45]	.01   0.69	≤ .001   0.93	.11   0.47
	Min. tlc (s)	2.15 (0.35) [1.96, 2.33]	1.74 (0.51) [1.57, 1.90]	1.47 (0.71) [1.25, 1.71]	.004   0.87	≤ .001   1.08	.13   0.44
	Longitudinal	Eyes on (s)	-	1.03 (0.34) [0.90, 1.17]	0.99 (0.40) [0.85, 1.13]	-	-
Hands on (s)		1.55 (0.54) [1.23, 1.88]	2.00 (0.64) [178, 2.23]	1.78 (0.53) [1.60, 1.96]	.09   0.74	.20   0.43	.22   0.38
First braking (s)		2.83 (0.39) [2.61, 3.04]	3.06 (0.52) [2.88, 3.25]	2.98 (0.43) [2.83, 3.13]	n.s.	n.s.	n.s.
Min. distance (m)		11.08 (4.14) [8.79, 13.37]	9.17 (5.00) [7.43, 10.91]	10.21 (4.05) [8.84, 11.58]	n.s.	n.s.	n.s.
Min. time gap (s)		0.44 (0.14) [0.36, 0.52]	0.37 (0.18) [0.31, 0.43]	0.41 (0.14) [0.37, 0.43]	n.s.	n.s.	n.s.

### 3.5.2 Longitudinal driver intervention

The only significant influence of cognitive task difficulty found in the longitudinal maneuver was on *time to hands on* ( $F(2, 80) = 3.17$ ;  $p = .05$ ;  $\eta^2 = .11$ ). However, none of the pairwise comparisons reached significance (Table 7; Figure 8, right). Neither *time to eyes on* ( $F(1, 59) = 0.20$ ;  $p = .66$ ;  $\eta^2 < .01$ ), nor *time to first braking* ( $F(2, 82) = 1.37$ ;  $p = .26$ ;  $\eta^2 = .03$ ) were influenced by the cognitive task load. There was also no effect on *min. distance* ( $F(2, 82) = 1.06$ ;  $p = .35$ ;  $\eta^2 = .03$ ), *min. time gap* ( $F(2, 82) = 1.45$ ;  $p = .24$ ;  $\eta^2 = .04$ ), or reaction type ( $\chi^2(2) = 5.25$ ;  $p = .07$ ). Drivers reacted about equally often with braking only (control group: 40%; *easy task*: 38%; *difficult task*: 64%), or braking and steering (Figure 6, bottom right).



**Figure 8.** Reaction times and measures of take-over quality in the lateral (left) and longitudinal maneuver (right) for driver groups with different cognitive task load, means with standard deviations as error bars. *min. distance* was divided by ten for a better presentation. \*  $p \leq .05$  \*\*  $p \leq .01$ .

#### 4. Discussion

The aim of the current study was to examine the impact of manual and cognitive load of non-driving related tasks on driver take-over performance in time-critical situations. The task consisted of reading a news text on a tablet which was either handheld or mounted in the vehicle. Cognitive task load was varied by a reading versus a proofreading task. A braking and a steering scenario were examined.

##### 4.1 Influence of manual task load on take-over performance

High manual task load led to later reactions and deteriorated take-over quality. When the tablet was held by the drivers instead of being mounted in the vehicle, drivers needed on average about 0.3 s (longitudinal scenario) to 0.4 s (lateral scenario) longer for the first gaze at the road and about 0.6 s (longitudinal scenario) to 0.7 s (lateral scenario) longer for the first contact with the steering wheel. In both scenarios, the increase in time to eyes on road can be interpreted as a medium effect ( $d = 0.6$  and  $d = 0.7$ , respectively), while the prolonged time to hands on was found to be a large effect ( $d = 1.0$  and  $d = 1.2$ , respectively; Cohen, 1988). Especially the difference in time to hands on between drivers of the *mounted* and the *handheld* condition appears to be a robust effect, with no overlap of confidence intervals in both scenarios. A large effect was also found on the time of the driver intervention in the steering maneuver ( $d = 0.9$ ), but not in the braking maneuver. In the steering maneuver, drivers with

high manual task load needed on average 2.8 s for the first steering intervention, which was about 0.8 s longer compared to drivers without non-driving related task. Confidence intervals of both driver groups did not overlap. Take-over quality also suffered from high manual task load, as reflected by a larger deviation from the center of the lane in the steering maneuver (large effect,  $d = 0.9$ ) and a shorter time gap to the leading vehicle in the braking maneuver (medium effect,  $d = 0.6$ ). However, even with high manual task load, drivers on average still had a minimum time to lane change of more than 1 s in reserve and a distance to the leading vehicle of more than 8 m in reserve.

In summary, impairing effects of high manual task load on reaction times and take-over quality were found in both scenarios, but were more pronounced in the steering scenario. This is in accordance with the expectation that manual task load should impact a steering maneuver more than a braking maneuver. However, it was unexpected that even the time until the first gaze at the street was longer in the *handheld* than in the *mounted* condition. The reason for this was found when categorizing the drivers according to how they dealt with the tablet in the take-over situation. About a third of the drivers of the *handheld* condition put the tablet aside first and took over subsequently. In comparison to drivers putting the tablet aside and taking over in parallel, these drivers needed much longer for the first contact with the steering wheel and for the first gaze at the road.

#### *4.2 Influence of cognitive task load on take-over performance*

Unlike manual load, cognitive task load had no general effect on take-over performance, but affected the lateral and longitudinal maneuver differently.

##### *4.2.1 Lateral driver intervention*

In the steering maneuver, there was an effect of cognitive load on all reaction times (apart from the first road fixation) as well as on take-over quality. As compared to the control group, drivers engaging in the reading task needed on average 0.5 s longer for the first contact with the steering wheel and 0.4 s longer for the steering intervention. Both of these effects can be interpreted as large ( $d = 0.9$ ) and robust, with no overlap of confidence intervals. Furthermore, drivers with a reading task drifted on average about 0.2 m further off the lane center (medium effect) and had a shorter minimum tlc (large effect) than

drivers of the control group. Compared to the reading task, the additional cognitive load induced by the proofreading task did not seem to further deteriorate take-over performance in a significant way. The differences in reaction times and measures of take-over quality between drivers with a reading and proofreading task were small ( $d < 0.5$ ) and statistically not significant, with partly large overlaps of confidence intervals.

These findings are in accordance with previous research by Merat et al. (2012) and Zeeb et al. (2016) who reported that the ability to regain vehicle control deteriorated due to the engagement in non-driving related tasks. In contrast to those studies, the present results show that reaction times may suffer in addition to take-over quality. The prolonged first contact with the steering wheel was particularly unexpected given that this was assumed to be a primarily reflexive action not influenced by cognitive task load. This effect might be explained by the fact that time-critical scenarios requiring immediate driver intervention were examined in the present study. This is different from the earlier studies cited above (Merat et al., 2012; Zeeb et al., 2016), in which the scenarios were not nearly as time-critical as they were in the present study. This could imply that, when given sufficient time, drivers engaging in a non-driving related task do not necessarily take more time to react as drivers without additional task. This is most likely due to the fact that drivers do not intervene in vehicle control immediately when they are given more time than required. This is indicated by previous research which found that a longer time budget or a decreased urgency of the situation led to longer reaction times (Gold et al., 2013; Walch et al., 2015). Negative effects of non-driving related tasks on reaction times might thus only become visible when the situation requires a fast driver intervention.

#### *4.2.2 Longitudinal driver intervention*

A different picture was found in the longitudinal scenario. Here, only the time needed to put the hands on the steering wheel was influenced by cognitive task difficulty, whereas no impact was found on the remaining variables, including take-over quality. However, differences among groups in time to hands on just reached statistical significance ( $p = .05$ ) and confidence intervals of all three groups overlapped. Given the increased likelihood for Type I errors due to multiple comparisons, this effect has most likely no practical significance.

One possible explanation of why engagement in a difficult task compared to an easy task led to impairments in steering but not in braking maneuvers might be found when taking a closer look at the reaction type. Drivers with a difficult task seemed to react more often with additional braking (lateral maneuver,  $p = .08$ ), or with braking only (longitudinal maneuver,  $p = .07$ ), compared to drivers with an easy task or without a task, even though these differences just missed the level of statistical significance. This finding could imply that drivers who are intensively engaged in another task are particularly likely to use braking in an attempt to defuse the situation and to gain more time to act. These ‘emergency’ braking reactions might have led to shorter braking reaction times when intervening in longitudinal vehicle control, but might have prolonged the steering intervention in the lateral maneuver. Support for this assumption can be found in previous research. Louw et al. (2015) report that drivers with a non-driving related task reacted more often with an additional braking intervention compared to drivers without another task. Gold et al. (2013) similarly found that the less time drivers were given to react, the more often they reacted with a braking intervention. It could thus be assumed that drivers who find themselves in a challenging situation – because they are engaging in a non-driving related task or because the time budget is small – spontaneously react with braking to de-escalate the situation.

Another important influencing factor could be the type of stimulus to which the drivers reacted in both scenarios. In the longitudinal scenario, drivers had to react to another vehicle suddenly cutting in ahead of the driver.

Another reason for the absence of an effect of cognitive task load in the braking scenario could be the type of stimulus to which the drivers reacted. In this scenario, drivers had to react to another vehicle suddenly cutting in ahead of the driver. This is presumably a highly valent stimulus whose interpretation does not require intense cognitive processing. The drivers’ reaction to it might thus be not as strongly influenced by their cognitive state as it might be if a situation requires profound understanding. Support for the assumption that drivers reacted more reflexively in the braking compared to the steering maneuver can also be found in the learning effects reported in Section 3.3. While all reaction times showed clear learning effects in the lateral maneuver (large effect,  $\eta^2 = .19$ ), drivers started braking equally fast in the longitudinal maneuver, independently of whether it was the second or the third take-over they experienced. This might support the notion that braking is a well-trained, internalized action

that can be carried out reflexively – even by a driver who is very engaged in a non-driving related task. These assumptions would suggest that high cognitive workload does not necessarily deteriorate the drivers' reaction to an obvious and easily processed stimulus. In case of a more complex stimulus requiring deeper cognitive processing, however, the high use of mental resources might lead to an increase in switch costs if these resources are required, but not immediately accessible by the driving task. This is in line with previous research, which found a relationship between task difficulty and switch costs (Iqbal & Bailey, 2006; Salvucci et al., 2009).

#### *4.3 Limitations of the present study and future research*

The suggestions outlined above might be helpful to explain the present results and divergent findings of previous research on the impact of the drivers' engagement in non-driving related tasks during automated driving. However, some limitations of the present study require closer investigation in future studies. It is argued that the influence of cognitive task load might be moderated by the reaction type (steering vs. braking) and the perceptual difficulty of the take-over situation (reflexive reaction to an easily processed stimulus vs. stimulus requiring deeper cognitive processing). In the present study, both factors are not independent of each other, which limits their interpretation. It is not clear, whether cognitive task difficulty had little to no effect in the braking maneuver, because braking itself is a more intuitive reaction or because this reaction was triggered by an easily processed stimulus. Further studies should systematically vary both factors in order to derive clear assumptions about their influence. Another factor that might limit the generalizability of the present findings is the relatively short duration of the automated drive. Engaging in a cognitively demanding task for a longer period of time might cause fatigue. In the present study, however, participants drove in automated mode for only about 8 min before each of the take-over scenarios, so that drivers might not yet have experienced fatigue. As fatigue might be a decisive influencing factor on drivers' ability to regain vehicle control, this should be subject to further examinations in future research.

## **5. Conclusions**

Several implications can be derived from the data presented here. Engaging in a handheld tablet compared to a tablet mounted in the vehicle lead to later driver responses and impaired take-over quality when resuming vehicle control after automated driving in time-critical scenarios. Surprisingly, not only manual reactions were affected, but also the first gaze at the road. These effects were found both in the braking and steering maneuver, but were more pronounced in the latter. These results point to the potential danger of using handheld devices such as smartphones or tablets during automated driving. Handheld phoning is already considered a risk for road safety during manual driving. Given the potentially increasing willingness to engage in non-driving related tasks during automated driving, it is predictable that manual task load may have important influences on road safety in the future.

The impact of cognitive task load was not as uniform as the impact of manual task load. Whereas reaction times and take-over quality deteriorated with increasing cognitive load in the steering scenario, hardly any influence of task difficulty was found in the braking scenario. One possible explanation for this unexpected finding could be that especially drivers who are intensively engaged in a non-driving related task instinctively react with a braking intervention in order to gain more time. This interpretation might also shed some light on previous research which reported both an improving and deteriorating take-over performance due to non-driving related task engagement. However, the results presented here can only provide a first explanatory approach which should be further examined in future studies.

## **Acknowledgements**

This work results from the joint project Ko-HAF - Cooperative Highly Automated Driving and has been funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy based on a resolution of the German Bundestag.

## References

- Carsten, O., Lai, F., Barnard, A., Merat, N., & Jamson, A. (2012). Control task substitution in semi-automated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 747–761.
- Cohen J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York, NY: Routledge Academic.
- Daneman, M., Reingold, E., & Davidson, M. (1995). Time course of phonological activation during reading: Evidence from eye fixations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(4), 884–898.
- Dingus, T., Klauer, S., Neale, V., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J., & Knipling, R. R. (2006). *The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Endsley, M., & Kiris, E. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human factors*, 37(2), 381–394.
- Engström, J. A., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, (8), 97–120.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39, 175–191.
- Flemisch, F., Heesen, M., Hesse, T., Kelsch, J., Schieben, A., & Beller, J. (2012). Towards a dynamic balance between humans and automation: authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations. *Cognition, Technology & Work*, 14, 3–18.
- Gold, C., & Bengler, K. (2014). Taking over control from highly automated vehicles. In N. A. Stanton, S. Landry, G. Di Bucchianico, & A. Vallicelli (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 64–69).
- 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* (pp. 1938–1942).
- Greenberg, J., Tijerina, L., Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., Kochhar, D., Kozak, K., & Blommer, M. (2003). Evaluation of driver distraction using an event detection paradigm. *Journal of the Transportation Research Board*, 1843(1), 1–9.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6, 65–70.
- Horrey, W., & Wickens, C. (2007). In-vehicle glance duration: distributions, tails, and model of crash risk. *Transportation Research Record*, 2018(1), 22–28.
- Iqbal, S. T., & Bailey, B. P. (2006). Leveraging characteristics of task structure to predict the cost of interruption. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems* (pp. 741–750). ACM.
- Kaakinen, J., & Hyönä, J. (2010). Task effects of eye movements during reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(6), 1561–1566.
- Llaneras, R., Salinger, J., & Green, C. (2013). 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*, 92–98.
- Louw, T., Merat, N., & Jamson, A. (2015). Engaging with highly automated driving: To be or not to be in the loop? In *8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Salt Lake City, Utah, USA.

- Merat, N., Jamson, A., Lai, F., Daly, M., & Carsten, O. (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.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134–140.
- Monsell, S., Sumner, P., & Waters, H. (2003). Task-set reconfiguration with predictable and unpredictable task switches. *Memory & Cognition*, 31(3), 327–342.
- Naujoks, F., Mai, C., & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions. In T. Ahram, W. Karwowski, & T. Marek (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)*, Krakow, Poland.
- Neubauer, C., Matthews, G., & Saxby, D. (2012). The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 56th annual meeting* (Vol. 56, No. 1, pp. 1987–1991). Sage Publications.
- 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* (pp. 2063–2067).
- Rogers, R., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(2), 207–231.
- SAE International (2014). *Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems* (J3016). Retrieved from [http://standards.sae.org/j3016\\_201401/](http://standards.sae.org/j3016_201401/)
- Salvucci, D., Taatgen, N., & Borst, J. (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).
- Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Petermann-Stock, I., & Othersen, I. (2015). The interaction between highly automated driving and the development of drowsiness. In *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE)*, Las Vegas, USA.
- Trafton, J., Altmann, E., Brock, D., & Mintz, F. (2003). Preparing to resume an interrupted task: effects of prospective goal encoding and retrospective rehearsal. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 583–603.
- 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). New York, USA, ACM.
- Wickens, C. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention* (pp. 63–102). New York: Academic Press.
- De Winter, J., Happee, R., Martens, M., & 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*, 24, 196–217.
- 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 and Prevention*, 78, 212–221.
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2016). *Is take-over time all that matters?* The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis and Prevention*, 92, 230–239.