

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung -Teil 2-

Tobias Vogelpohl

Mark Vollrath

Matthias Kühn

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung

Teil 2: Müdigkeit und lange Fahrdauer als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung

M. Sc. Tobias Vogelpohl
Prof. Dr. Mark Vollrath
Dr.-Ing. Matthias Kühn

Impressum

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin

Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

E-Mail: unfallforschung@gdv.de

Internet: www.udv.de

Facebook: www.facebook.com/unfallforschung

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

YouTube: www.youtube.com/unfallforschung

ISBN-Nr.: 978-3-939163-77-0

Redaktion: Dr.-Ing. Matthias Kühn

Bildnachweis: UDV und siehe Quellenangaben

Erschienen: 06/2017

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV)

Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung

Teil 2: Müdigkeit und lange Fahrtdauer als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung

Bearbeitet durch:

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



Bei der UDV betreut von:

Dr.-Ing. Matthias Kühn



Inhalt

Zusammenfassung	7
Abstract	8
1. Einleitung zu Teil 2 der Studienreihe	9
2. Müdigkeit und Dauer der Fahrt als Einflussfaktoren auf Fahrleistung	12
2.1. Definitionen	12
2.1.1. Müdigkeit	12
2.1.2. Belastung und Beanspruchung	14
2.1.3. Vigilanz	14
2.1.4. Time-on-task	14
2.1.5. Circadianer Rhythmus	15
2.2. Fahrermüdigkeit als Risikofaktor im Verkehr	15
2.2.1. Einflussfaktoren auf die Entstehung von Fahrermüdigkeit	16
2.2.2. Einfluss von Fahrermüdigkeit auf die Qualität der Fahrzeugführung	16
2.2.3. Verkehrsunfälle und Fahrermüdigkeit	18
2.2.4. Messung von Fahrermüdigkeit	19
2.2.5. Gegenmaßnahmen für Fahrermüdigkeit	21
2.3. Fahrermüdigkeit als Risikofaktor bei automatisierten Fahrerassistenzsystemen	22
3. Studie: Müdigkeit und lange Fahrdauer als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung	24
3.1. Fragestellungen und Versuchsdesign	25
3.2. Versuchsaufbau und Methodik	26
3.2.1. Gestaltung des Übernahmeszenarios	26
3.2.2. Fähigkeiten der simulierten Automation	28
3.2.3. Versuchsablauf und Instruktion der Probanden	28
3.2.4. Definition der gemessenen Parameter	29
3.2.4.1. Fahrermüdigkeit	29
3.2.4.2. Reaktionszeiten	30
3.2.4.3. Fahrdaten	31
3.2.4.4. Subjektive Daten	32
3.3. Beschreibung der Stichprobe	32
3.4. Ergebnisse und Diskussion	33
3.4.1. Müdigkeit im Verlauf der Fahrt	33
3.4.2. Reaktionszeiten und Qualität der Fahrzeugführung nach einer Übernahmeaufforderung	40
3.4.3. Subjektive Einschätzung der Übernahmesituation	47
3.4.4. Einschränkungen und Limitationen der Ergebnisse	48

4. Empfehlungen und Ausblick	50
5. Literatur	52
6. Anhang: Fragebogen nach der Übernahmesituation	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Interaktion von Schlafmangel und Belastung/Beanspruchung führt zu einer Verminderung der Wachheit. Adaptiert nach Hargutt (2007) mit eigenen Ergänzungen.	13
Abbildung 2: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums (Foto: Matthias Powelleit).	26
Abbildung 3: Angaben der Testfahrer über ihren subjektiven Kenntnisstand zum Thema automatisiertes Fahren.....	32
Abbildung 4: Angaben der Testfahrer über ihre jährliche Fahrleistung in Kilometern.	32
Abbildung 5: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.....	35
Abbildung 6: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.....	35
Abbildung 7: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren mit Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.....	36
Abbildung 8: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren mit Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.....	36
Abbildung 9: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren ohne Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.	37
Abbildung 10: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren ohne Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.....	37
Abbildung 11: Letzte Müdigkeitsbewertung durch geschulte Bewerter vor der Übernahmeaufforderung in den verschiedenen Versuchsbedingungen.....	38
Abbildung 12: Mittlere subjektive Müdigkeitsbewertung der Fahrer auf der Karolinska Sleepiness Skala vor der Übernahmeaufforderung (links) und nach dem Versuch (rechts). .	39
Abbildung 13: Darstellung der Dauer der Bewegungen zu den Stellteilen Lenkrad und Pedale nach einer Übernahmeaufforderung.	41
Abbildung 14: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zur Deaktivierung der Automation nach einer Übernahmeaufforderung.	42
Abbildung 15: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho nach einer Übernahmeaufforderung.	44

Abbildung 16: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick in den Seitenspiegel nach einer Übernahmeaufforderung.	44
Abbildung 17: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho nach einer Übernahmeaufforderung/Warnung.	45
Abbildung 18: Anteil der Reaktionen auf das bremsende, vorausfahrende Fahrzeug nach der Übernahmesituation/Warnung in den einzelnen Versuchsbedingungen.	46
Abbildung 19: Mittlere Bremsreaktionszeit nach dem Auftreten des kritischen Events und Standardabweichungen.	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung des Versuchsdesigns und der Stichprobenplanung.....	26
Tabelle 2: Mögliche Zustände der Automation und verwendete Symbolik.	27
Tabelle 3: Müdigkeitsstufen und den geschulten Müdigkeits-Bewertern erfasste objektive Müdigkeitsindikatoren für jede Stufe.....	30
Tabelle 4: Definierte Reaktionszeiten und Endzeitpunkte der Reaktionszeitmessungen.....	31
Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der subjektiven Befragung der Versuchspersonen hinsichtlich der Übernahmesituation; Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern).	48

Zusammenfassung

In zukünftigen automatisiert fahrenden Fahrzeugen werden Fahrer mit den verschiedensten Fahrerzuständen automatisierte Fahrten erleben. Wie auch beim manuellen Fahren werden Fahrer gestresst, abgelenkt oder ermüdet sein, werden an Schlafmangel leiden und Einbußen in Ihrer Konzentrationsfähigkeit zeigen. Aktuell ist jedoch nur wenig darüber bekannt, wie sich solche Fahrerzustände auf die Fähigkeit zur Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung auswirken.

Die vorliegende Fahrsimulator-Studie untersucht die Veränderung und Auswirkung des Fahrerzustands während einer hochautomatisierten Fahrt (level 3) im Hinblick auf Müdigkeit und Ermüdung während der Fahrt. Fahrer wurden während des Verlaufs der Fahrt regelmäßig von geschulten Müdigkeits-Bewertern in Ihrer Müdigkeit eingestuft. Bei Erreichen eines bestimmten Müdigkeitslevels bzw. nach einer Fahrtdauer von ca. einer Stunde wurde eine Übernahmeaufforderung ausgelöst. Während der Übernahmeaufforderung wurden Reaktionszeiten und Fahrverhalten gemessen und mit Reaktionszeiten und Fahrverhalten von manuellen Fahrern in der gleichen Situation verglichen.

Es zeigte sich, dass automatisiert fahrende Fahrer deutlich schneller höhere Müdigkeitslevel erreichen als manuelle Fahrer. Die Dauer der Fahrt, die für das Erreichen von höheren Müdigkeitslevel notwendig war, hing sowohl bei manuellen als auch bei automatisiert fahrenden Fahrern von vorab induziertem Schlafmangel ab. Automatisiert fahrende Fahrer mit Schlafmangel erreichten mittlere Müdigkeitslevel mit verlängerten Lidschlüssen bereits nach ca. 15-20 Minuten und damit um bis zu 15-20 Minuten früher im Vergleich zu manuellen Fahrern mit Schlafmangel. Die automatisiert fahrenden Fahrer mit und ohne Schlafmangel waren grundsätzlich in der Lage, die manuelle Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung ohne Unfälle wieder zu übernehmen. Allerdings zeigten sich bei allen automatisiert fahrenden Fahrern Verzögerungen im Aufbau des Situationsbewusstseins um ca. 3 Sekunden im Vergleich zu den manuellen Fahrern. Die Übernahmezeiten waren bei automatisiert fahrenden Fahrern nach einer langen Fahrt (ca. 1 Stunde) bzw. mit Schlafmangel daher vergleichbar lang wie nach einer Fahrt mit einer stark ablenkenden Nebentätigkeit. 90% der Fahrer schalteten die Automation nach ca. 5-7 Sekunden ab. Verwendet man als Maß für den Aufbau des Situationsbewusstseins nach einer Übernahmesituation allerdings den ersten Blick in den Seitenspiegel bzw. den ersten Blick auf den Tacho, so benötigten Fahrer ca. 12-15 Sekunden, um sich ein Bild von ihrer Fahrumgebung und von dem Zustand ihres Fahrzeugs zu machen.

Vor dem Hintergrund der schnellen Entwicklung von Fahrermüdigkeit während automatisierter Fahrten ohne Nebenaufgaben ist die dauerhafte Überwachung des Zustands der Automation durch den Fahrer nicht realistisch. Fahrern sollte stattdessen die Möglichkeit gegeben werden, kontrollierbare Nebenaufgaben durchzuführen, die Rückschlüsse auf den Fahrerzustand geben und im Falle einer Übernahmesituation durch das Fahrzeug unterbrochen werden können. Zusätzlich sollte das Fahrzeug Informationen über den Fahrerzustand vor einer Übernahmesituation haben, um die Dauer des Übergangs entsprechend planen zu können. Zukünftige Studien sollten die unterschiedlichen Fahrerzustände während einer automatisierten Fahrt und deren Auswirkungen auf das Übernahmeverhalten genauer untersuchen. Zusätzlich sollte der Aufbau des Situationsbewusstseins nach einer Übernahmeaufforderung weiter in den Fokus der Forschung gerückt werden, um Rückschlüsse auf mögliches Fehlverhalten nach der Übernahme der manuellen Steuerung zu erhalten.

Abstract

In future automated vehicles drivers will experience a variety of driver states. Similar to manual driving, drivers will be stressed, distracted or tired, will suffer from sleep loss and a lack of concentration. Few studies have examined how such driver states influence the ability to take back manual control after a take-over request.

This driving simulator study analyzes the progression and the impact of the driver states sleepiness and fatigue during highly automated driving. Drivers were regularly rated by trained sleepiness raters during driving. A take-over request was issued if a predefined sleepiness level was reached, or if the drive had lasted for approximately one hour. In the course of the take-over request reaction times and driving behavior were measured and compared to reaction times and driving behavior of manual driver in the same situation.

It could be shown that automated drivers reached higher levels of sleepiness faster than manual drivers. The driving time required to reach higher levels of sleepiness depended on a previously induced lack of sleep for both the automated and the manual drivers. Automated drivers reached intermediate levels of sleepiness with prolonged eyelid closures after only about 15 to 20 minutes, which was 15 to 20 minutes earlier than manual drivers who also suffered from a lack of sleep. Automated drivers with and without a lack of sleep were generally able to take back manual control after a take-over request without crashing. However, the formation of situation awareness was delayed by about 3 seconds for all automated drivers compared to the manual driving conditions. Take-over times for automated drivers after a long drive (approx. 1 hour) or with a lack of sleep respectively, were therefore comparable to take-over times after a drive with a highly distracting secondary task. 90% of the drivers disengaged the automation after about 5 to 7 seconds. However, if the first glances to the side mirror and the first glances to the speed display are used as an indicator for situation awareness after a take-over request, drivers needed about 12 to 15 seconds to form an understanding of the situation.

Looking at the fast progression of driver fatigue during automated driving without secondary tasks, continuous supervision of automated driving is unrealistic. Instead, drivers should be provided with the opportunity to engage in controllable tasks, which allow the car to infer the driver state and which can be disabled by the cars systems in the event of a take-over situation. Additionally, the system should collect data about the drivers' state previous to a take-over request to be able to plan the duration of the take-over accordingly. Future studies should take a closer look at different driver states during automated driving to be able to predict their impact on take-over behavior. Also, the formation of situation awareness after a take-over request should be the focus of further investigations to gain insights into inappropriate driver reactions after a take-over.

1. Einleitung zu Teil 2 der Studienreihe

Automatisiertes Fahren ist weiter auf dem Vormarsch. Funktionen wie Stau-Piloten und Autobahn-Assistenten werden bereits heute in aktuelle Serienfahrzeuge verschiedener Hersteller integriert und ermöglichen quasi-automatisiertes Fahren über längere Zeiträume. Gleichzeitig werden in Deutschland und weltweit Testfelder für die nächsten Stufen des automatisierten Fahrens aufgebaut. Die Consumer Electronics Show 2017, seit einigen Jahren für Autohersteller und Zulieferer ein wichtiger Termin für die Veröffentlichung neuer Technologien und Visionen, zeigt deutlich den Fokus der Fahrzeug-Entwickler: Automatisches Fahren ist ein wichtiges Thema bei klassischen OEMs wie Audi, BMW, Fiat-Chrysler, Ford, Hyundai, Mercedes, Nissan und Toyota aber auch bei neuen Marken wie Faraday Future und Tesla, sowie bei Zulieferern wie Bosch, Continental, Delphi und NVIDIA. Ein Fokus der Entwicklung liegt ganz klar auf der Gestaltung des Innenraums für die Nutzung während der Fahrt. Hersteller versuchen, die Kundenwünsche für die automatisierten Fahrzeiten zu antizipieren und statten ihre Fahrzeuge mit neuen Technologien zur Interaktion mit Infotainment-Systemen in den Fahrzeugen aus. Die fortschreitende Konnektivität der Infotainment-Systeme soll langfristig das Wohnzimmer und das Büro zum Fahrer bringen. Geht es nach Vorstellung der Hersteller, so soll sich der Fahrer immer stärker zum Passagier, das Fahrzeug immer mehr zum Wohn- und Arbeitsraum wandeln.

Dieser Vision folgend werden in absehbarer Zukunft Fahrer mit verschiedensten Eigenschaften und in verschiedensten Zuständen automatisierte Fahrfunktionen nutzen. Der ideale Fahrer existiert nicht: Auch in automatisierten Fahrzeugen werden abgelenkte, müde, erschöpfte, gelangweilte, aufgeregte und wütende Menschen sitzen. Zwar wirken diese Zustände sich während der Phasen des automatisierten Fahrens nicht mehr unmittelbar auf das Fahrverhalten aus. Sobald aber ein Eingriff des Fahrers in die Steuerung entweder vom Fahrzeug gefordert oder vom Fahrer selbst initiiert wird, findet der Kontrollübergang immer bei einem bestimmten Fahrerszustand statt. Bevor Automation den Massenmarkt erreicht, gilt es daher, Fahrerszustände zu identifizieren, die sich negativ auf die Fähigkeit zur Übernahme der Steuerung nach einer automatisierten Fahrt auswirken können. Außerdem sollte der Einfluss solcher Zustände quantifizierbar gemacht werden, um Empfehlungen für entsprechende Gegenmaßnahmen aussprechen zu können und Grenzen für Fahrerszustände festzulegen, in denen Kontrollübernahmen sicher und komfortabel möglich sind.

In Teil 1 dieser Studienreihe wurde eine empirische Fahrsimulator-Studie zur Dauer und Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer automatisierten Fahrt vorgestellt. Hierbei zeigte sich, dass insbesondere Fahrer, die durch motivierende Nebenaufgaben stark von der Fahrt abgelenkt waren, nicht nur länger brauchten um die Automation zu deaktivieren und die Steuerung zu übernehmen, sondern auch nach der Übernahme der Steuerung noch in Ihrem Bewusstsein für die Entwicklung der Fahrsituation eingeschränkt waren (Vogelpohl et al., 2016). Auch hier zeichnete sich also bereits ein Einfluss des Fahrerszustands – Ablenkung – auf die Fähigkeit zur Übernahme der Steuerung nach Phasen des hochautomatisierten Fahrens ab. Wir empfehlen auf Basis dieser Ergebnisse bereits in Teil 1 dieser Studienreihe eine Überwachung der Tätigkeiten des Fahrers während der automatisierten Fahrt, um die Dauer des Übernahmeprozesses an den Bedarf des Fahrers anpassen zu können. Welche weiteren fahrerbezogenen Einflussfaktoren lassen sich vermuten, die den Übergang zur manuellen Steuerung negativ beeinflussen? Studien zum Einfluss von Fahrerszuständen auf die Unfallwahrscheinlichkeit beim manuellen Fahren bieten sicherlich auch eine Orientierung zur Identifizierung von

potenziell gefährlichen Fahrerzuständen für einen Kontrollübergang vom automatisierten zum manuellen Fahren.

Müdigkeit am Steuer ist eine häufige Ursache für Unfälle auf deutschen Straßen (Statistisches Bundesamt, 2015). Einige Studien zeigen, dass Müdigkeit die Fähigkeit, ein Fahrzeug sicher zu führen, ähnlich stark beeinflussen kann wie alkoholisiertes Fahren (z.B. Williamson und Feyer, 2000). Da ist es wenig verwunderlich, dass sich gerade auf deutschen Autobahnen viele tödliche oder schwere Unfälle direkt oder zumindest indirekt auf Fahrer-Müdigkeit zurückführen lassen (ADAC, 2012). Die monotone Fahraufgabe auf Autobahnen kann über längere Zeiträume eine Abnahme der dauerhaften Aufmerksamkeit begünstigen und besonders in Kombination mit Schlafmangel schnell zu Sekundenschlaf-Episoden, Tunnelblick, verringerter Spurhaltequalität oder Geschwindigkeitsschwankungen führen.

Die Dauer der Fahrt sowie die Müdigkeit der Fahrer, die aus dieser Dauer und aus dem Mangel an Schlaf entsteht, lassen sich also bereits als wichtige Einflussfaktoren auf die Fahrerleistung identifizieren. Sind diese Faktoren auch für Fahrer mit Automation relevant? Es lässt sich bereits mit Sicherheit sagen, dass Fahrer früher oder später auch in automatisierten Fahrzeugen lange Fahrtauern erleben werden. Außerdem werden auch in solchen Fahrzeugen Menschen sitzen, die in der Nacht vor der Fahrt schlecht oder zu wenig geschlafen haben, die nach einem Arbeitstag müde sind und dem Fahren nicht mehr ihre volle Aufmerksamkeitskapazität widmen können. Es steht zu vermuten, dass gerade in automatisierten Fahrzeugen Fahrer die Fahrzeit nutzen wollen, um sich zu entspannen. Diese grundsätzlich positive Entspannung birgt aber auch immer die Gefahr einer Unterforderung während der Fahrt, die zu nachlassender Aufmerksamkeit bei der Überwachung monotoner Verkehrsszenarien führen kann. Monotone Aufgaben wie das Überwachen von automatisierten Fahrfunktionen begünstigen möglicherweise das Auftreten von Müdigkeit.

Ein aktueller Fall von Missbrauch einer automatisierten Fahrfunktion, bei der ein Fahrer eine automatisierte Staufahrt nutzt um zu schlafen, oder zumindest um zeitweise die Augen zu schließen¹, deutet auf die Brisanz dieses Themas für das automatisierte Fahren hin: Fahrer entwickeln teilweise unangemessenes Vertrauen in die neuen Funktionen ihrer Fahrzeuge und nutzen diese Funktionen nicht immer nur für die Anwendungsfälle, für die sie konzipiert wurden. Entsprechend gilt es nun die Gefahren von Müdigkeit und Ermüdung in automatisierten Fahrzeugen systematisch zu untersuchen und zu quantifizieren, um Empfehlungen für die Gestaltung und Verwendung solcher Systeme aussprechen zu können.

Dieser Forschungsbericht adressiert die Problematik von Müdigkeit, die bei Fahrern durch die Dauer der Fahrt und/oder durch Schlafmangel während automatisierten Fahrten auftreten kann. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf dem Übergang vom automatisierten Fahren zurück zur manuellen Steuerung nach einer langen Fahrt, bzw. nach einer Fahrt mit Schlafmangel. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung der Müdigkeit über die Fahrtdauer in Abhängigkeit von diesen Faktoren. Der Forschungsbericht gibt zunächst einen kurzen Überblick über den Forschungsstand zu Müdigkeit und Ermüdung am Steuer und

¹ „A Tesla driver was caught sleeping on the highway with his car on Autopilot“ – Business Insider, <http://www.businessinsider.com/tesla-autopilot-driver-caught-sleeping-2016-5?IR=T> [online abgerufen am 17.01.2017].

definiert Begrifflichkeiten, die bei der Diskussion dieser Faktoren hilfreich sind. Aktuelle Methoden der Müdigkeitsforschung werden vorgestellt und verglichen.

Aufbauend auf diesen Methoden und der Literaturanalyse wurde eine empirische Studie zu Müdigkeit und Ermüdung durch verringerte Schlafdauer und lange Fahrten in automatisierten Fahrzeugen konzipiert. In dieser Studie wurde der Verlauf der Müdigkeitsentwicklung von manuellen Fahrern mit dem Verlauf bei automatisiert fahrenden Fahrern verglichen. Zusätzlich wurde das Verhalten von müden und von durch die Automation ermüdeten Fahrern nach einer Übernahmeaufforderung analysiert und mit den Ergebnissen aus Teil 1 dieser Studienreihe verglichen. Aufbauend auf der Literatur und den Ergebnissen der Studie werden Empfehlungen für die Gestaltung von automatisierten Fahrsystemen für müde Fahrer und lange Fahrdauern abgeleitet.

2. Müdigkeit und Dauer der Fahrt als Einflussfaktoren auf Fahrleistung

Lange Fahrten mit dem Auto sind für viele Fahrer Alltag. Millionen Menschen in Deutschland pendeln täglich mit dem Auto zur Arbeit. Nach einer Umfrage des Karriereportals StepStone benötigen 21% der Fahrer hierbei mehr als eine Stunde um zur Arbeitsstelle zu gelangen (StepStone, 2012). Häufig kommt auf solchen langen Fahrten Müdigkeit hinzu, besonders in den Abendstunden auf dem Rückweg von der Arbeitsstelle. Entsprechend berichteten zum Beispiel ca. 15% der Fahrer in einer Studie von Vanlaar et al. (2008) im Verlauf des vergangenen Jahres schon einmal am Steuer eingeschlafen oder „eingenickt“ zu sein.

Um Müdigkeit sowie geistige und körperliche Ermüdung zu verstehen, sind zunächst Definitionen der verschiedenen Arten von Müdigkeit und Ermüdung hilfreich. Auf diese Weise lassen sich Konzepte voneinander abgrenzen und die Interaktion zwischen verschiedenen Arten der Müdigkeit und Ermüdung gezielt betrachten. Nachfolgend werden Müdigkeit und Ermüdung als Risikofaktoren beim Autofahren genauer dargestellt. Begünstigende Bedingungen für die Entwicklung von Müdigkeit beim Fahren und die Auswirkungen dieser Beeinträchtigung auf das Fahrverhalten werden zusammenfassend präsentiert. Außerdem werden Methoden zur Quantifizierung der Beeinträchtigung durch Müdigkeit diskutiert und Gegenmaßnahmen zur Bekämpfung von Müdigkeit im Straßenverkehr vorgestellt.

2.1. Definitionen

2.1.1. Müdigkeit

Müdigkeit ist sowohl ein subjektiver Zustand als auch eine objektive körperliche und geistige Beeinträchtigung, deren Auswirkungen sich direkt und indirekt mit verschiedenen Maßen messen lassen. Wenn wir sagen, wir seien müde, meint das einen Zustand verminderter Wachheit, der durch das Zusammenspiel verschiedener Umstände zustande kommen kann. Lal und Craig (2001) definieren Müdigkeit als Übergangszustand zwischen Wachheit und Schlaf, der durch das subjektive Erleben von Müdigkeit sowie eine Verminderung der Leistungsfähigkeit gekennzeichnet ist. Grundsätzlich wird zwischen schlafbezogener Müdigkeit (engl. sleepiness) und aufgabenbezogener Müdigkeit (engl. fatigue) unterschieden. Schlafbezogene Müdigkeit kann ausschließlich durch Schlaf reduziert werden. Aufgabenbezogene Müdigkeit ist hingegen primär durch äußere Einflussfaktoren bedingt und kann auch durch Pausen bei der Aufgabenausführung reduziert werden (vgl. May & Baldwin, 2009).

Hargutt (2007) beschreibt in einem Modell, wie zwei primäre Faktoren die Entstehung von verminderter Wachheit bedingen können: 1. Eine Aufgabe wird in einem bestimmten Kontext ausgeführt und 2. die Person, die diese Aufgabe ausführt, hat eine bestimmte Schlafquantität und Schlafqualität. Die Aufgabenschwierigkeit in Kombination mit Umgebungsfaktoren führt zu einer Belastung. Aus dieser Belastung entsteht in Abhängigkeit von den Fähigkeiten der Person eine Beanspruchung. Aus einer schlechten Passung der Fähigkeiten der Person zu der Schwierigkeit der Aufgabe kann entweder eine zu hohe Beanspruchung (aktive Müdigkeit, siehe auch Abschnitt *Belastung und Beanspruchung*) oder eine zu niedrige Beanspruchung entstehen (passive Müdigkeit, siehe auch Abschnitt *Vigilanz*). Beide Formen der Beanspruchung begünstigen eine Verminderung der Wachheit (vgl. May & Baldwin, 2009). Ein Beispiel für eine zu niedrige Beanspruchung ist eine lange monotone Autofahrt

mit geringem Verkehr bei Nacht. Der Fahrer führt hier eine Tätigkeit aus, in der er sehr geübt ist. Gleichzeitig befindet er sich in einer reizarmen Umgebung.

Aus der Schlafquantität und Schlafqualität der Person kann ein Mangel an Schlaf entstehen. Dieser Mangel an Schlaf interagiert mit unserer „inneren Uhr“ (siehe Abschnitt *Circadianer Rhythmus*), die hauptsächlich an die Tageszeit gekoppelt ist. Trifft Schlafmangel auf Tiefpunkte unseres natürlichen Tagesrhythmus, so entsteht Schläfrigkeit. Das Zusammenspiel dieser Einflussfaktoren nach Hargutt (2007) ist in Abbildung 1 noch einmal schematisch dargestellt. Die Faktoren Schlafmangel und Beanspruchung durch die Aufgabe sind bei einer Autofahrt schwer voneinander zu trennen und beeinflussen sich gegenseitig. Trifft jedoch die monotone Umgebung und die niedrige Aufgabenschwierigkeit der oben beschriebenen Nachtfahrt auf einen unausgeschlafenen Fahrer, treten schnell gefährliche Grade von Müdigkeit auf, die die Qualität der Fahrleistung stark beeinflussen können.

Diese sogenannte *Fahrermüdigkeit* wird von Williamson, Feyer & Friswell (1996) als ein Zustand verminderter mentaler Wachsamkeit definiert, der die kognitive und motorische Leistung beim Fahren beeinträchtigt. Eine typische Folge von Fahrermüdigkeit ist

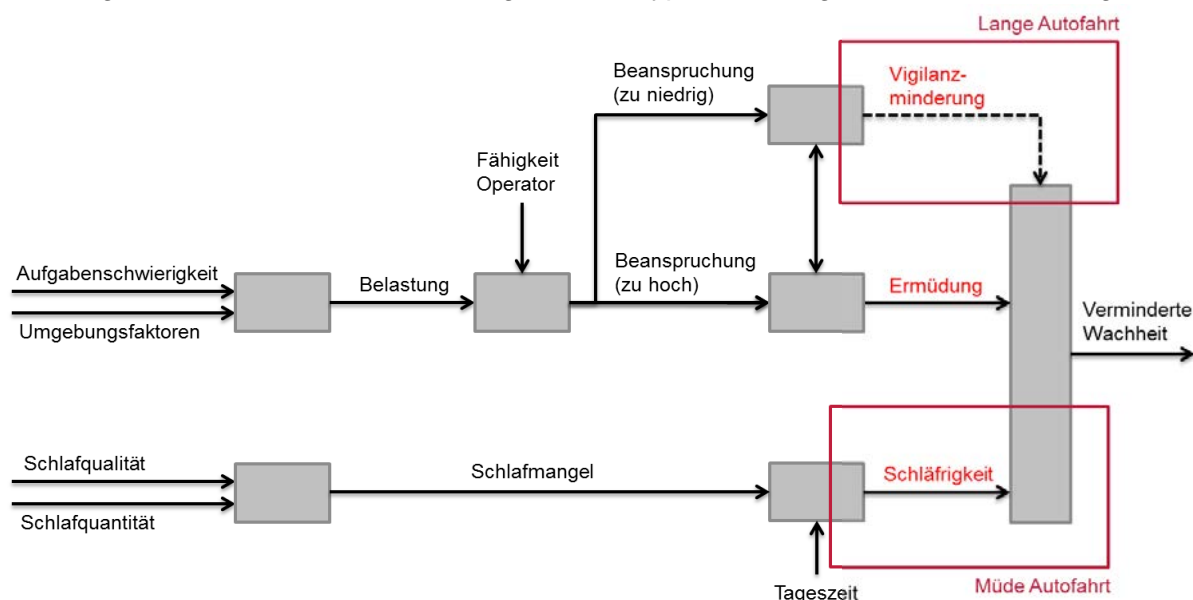


Abbildung 1: Die Interaktion von Schlafmangel und Belastung/Beanspruchung führt zu einer Verminderung der Wachheit. Adaptiert nach Hargutt (2007) mit eigenen Ergänzungen.

Benommenheit (eng. drowsiness), die sich subjektiv als Gefühl von reduzierter Aufmerksamkeit manifestiert, sich aber auch experimentell durch das Verpassen von relevanten Reizen aus der Umgebung nachweisen lässt (z.B. Dinges & Kribbs, 1991). Fahrermüdigkeit geht außerdem mit einem Nachlassen der Vigilanz einher, was sich als reduzierte Fähigkeit des Fahrers äußert, auf Reize aus der Fahrumgebung zu reagieren. Zusätzlich wird in diesem Zusammenhang häufig über das Phänomen des Tunnelblicks berichtet (engl. highway hypnosis). Hier lässt bei langen, monotonen Autofahrten mit der Zeit das Situationsbewusstsein nach. Ganze Streckenabschnitte verschwinden aus der Erinnerung des Fahrers und die Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer wird erschwert (*Driving Without Awareness*, Karrer et al., 2005; siehe auch Abschnitt 2.2.2). Auswirkungen von Fahrermüdigkeit auf das Fahrerverhalten und daraus entstehende Risiken werden noch einmal vertiefend im Abschnitt *Fahrermüdigkeit als Risikofaktor im Verkehr* dargestellt.

2.1.2. Belastung und Beanspruchung

In den Arbeitswissenschaften und anderen psychologischen Forschungsgebieten wird häufig zwischen den Begriffen *Belastung* und *Beanspruchung* unterschieden. Während Belastung als Wirkgröße in Abhängigkeit von den Eigenschaften einer Aufgabe auf eine Person einwirkt, entsteht Beanspruchung innerhalb der Person als Auswirkung dieser Belastung in der Interaktion mit den Eigenschaften einer Person (vgl. DIN EN ISO 10075, erläutert in Joiko, Schmauder und Wolff, 2010).

Es wird also zwischen den äußeren Anforderungen einer Aufgabe und den Auswirkungen dieser Aufgabe auf den menschlichen Organismus unterschieden. Aus der Überforderung einer Person (die Belastung durch die Aufgabe ist zu hoch für diesen individuellen Menschen) kann somit Ermüdung – auch als *aktive Müdigkeit* bezeichnet – entstehen, die die Wachheit im Verlauf der Aufgabenbearbeitung immer weiter verringert (vgl. Hargutt, 2007).

2.1.3. Vigilanz

Vigilanz ist grundsätzlich definiert als ein Zustand der allgemeinen Wachsamkeit, der durch mentale Angeregtheit oder Erregung (arousal) und Wachsamkeit (alertness) charakterisiert ist (Parasuraman, Warm & See, 1998). Vigilanz wird durch physische und mentale Ermüdung beeinträchtigt, die aus den Anforderungen einer Aufgabe sowie aus den Anforderungen einer Umgebung entstehen können (Davies & Parasuraman, 1982). Bestimmte Eigenschaften einer Umwelt und einer Aufgabe können im Verlauf der Aufgabenbearbeitung einen negativen Einfluss auf die Vigilanz haben. So nennen zum Beispiel Lal und Craig (2001) Lärm, Vibrationen und die Umgebungstemperatur als potenziell Vigilanz mindernde Umweltfaktoren. Auf der Seite der Aufgabe beschreiben die Autoren vor allem die Frequenz und den Abwechslungsreichtum einer Aufgabe als entscheidend für die Fähigkeit, Vigilanz über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten zu können.

Ein typisches Beispiel für eine Aufgabe, die hohe Anforderungen an die Vigilanz eines Menschen stellt, ist die Überwachung eines Radarbildschirms auf einem Schiff bei einer langen Fahrt durch Nebel. Das seltene Auftauchen von relevanten Objekten auf dem Bildschirm, die gleichzeitig hohe Frequenz von irrelevanten Störsignalen, sowie die Eintönigkeit der Geräusche und visuellen Reize in der Umgebung erschweren hier das dauerhafte Aufrechterhalten von Aufmerksamkeit. Über einen längeren Zeitraum kann es so zunehmend zum Verpassen von Objekten kommen, die den Kurs des Schiffs kreuzen. Durch die geringe Belastung durch die Aufgabe entsteht innerhalb der Person, die die Aufgabe ausführt, somit eine zu niedrige Beanspruchung, die im Verlauf der Aufgabenbearbeitung die Vigilanz immer weiter verringert und somit die Verringerung der Wachheit begünstigt. Die hieraus resultierende Müdigkeit wird auch als *passive Müdigkeit* bezeichnet.

2.1.4. Time-on-task

Das Bearbeiten einer Aufgabe über einen langen Zeitraum führt unweigerlich zu physiologischer und mentaler Ermüdung. Zwischen der Dauer der Aufgabenbearbeitung, der sogenannten *time-on-task*, und der daraus entstehenden Ermüdung lassen sich für verschiedene Aufgaben zeitliche Zusammenhänge herstellen. So konnten zum Beispiel van der Hulst, Meijman und Rothengatter (2001) das Nachlassen der Spurhaltefähigkeit in Abhängigkeit von der Fahrdauer zeigen. In dieser Studie konnten Fahrer zwar während einer Fahrdauer von 2.5 Stunden ihre Reaktionszeiten auf kritische Ereignisse auf einem konstanten Niveau halten, folgten der Fahrspur aber zunehmend schlechter und schätzten

sich auch subjektiv zunehmend müder ein. Ähnliche Effekte von time-on-task finden sich für verschiedenste Aufgabenbereiche, jeweils immer verbunden mit einem Nachlassen der Leistung im Verlauf der Aufgabenbearbeitung, vorausgesetzt die Aufgabe wird nicht für Pausen unterbrochen.

2.1.5. Circadianer Rhythmus

Der *circadiane Rhythmus* beschreibt die „innere Uhr“ des Menschen, die primär von der Tageszeit abhängig ist. Entsprechend folgt der circadiane Rhythmus ungefähr einem 24-Stunden Zyklus, außer wenn er durch äußere Faktoren wie zum Beispiel Zeitverschiebungen bei langen Flugreisen oder Nachtarbeit durcheinander gebracht wird. Menschen benötigen innerhalb dieses 24-Stunden Rhythmus im Durchschnitt ca. 8 Stunden Schlaf.

Die circadiane Rhythmik beeinflusst neben dem Schlaf-/Wach-Rhythmus unter anderem auch unsere Körpertemperatur, unser Verdauungssystem, sowie die Ausschüttung von Hormonen (Rosekind et al., 1994). Biologisch gesehen erlebt unser Körper ein Leistungstief zwischen Mitternacht und vier Uhr morgens. Einige Studien weisen auf ein weiteres, weniger ausgeprägtes, Tief zwischen zwei Uhr und vier Uhr nachmittags hin (Åkerstedt, 1995).

2.2. Fahermüdigkeit als Risikofaktor im Verkehr

Die Auswirkungen von Müdigkeit auf die allgemeine Leistungsfähigkeit von Menschen wurden aufgrund ihrer Relevanz für unterschiedlichste Arbeitsaufgaben bereits ausführlich untersucht. Bereiche wie das Führen von Maschinen und Anlagen, das Steuern von Passagierflugzeugen oder die Durchführung von militärischen Operationen erfordern ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und Präzision über lange Zeiträume und werden gleichzeitig häufig von durch Schichtarbeit oder langen Arbeitszeiten ermüdeten Personen durchgeführt.

In einem Review von Dingus und Kribbs (1991) wird deutlich, dass Müdigkeit bei Menschen mit einer Reihe von Beeinträchtigungen einhergeht, die sowohl physiologischer als auch kognitiver Natur sind: Reduzierte mentale und motorische Leistungsfähigkeit und eine reduzierte Leistungsmotivation. Die Autoren beschreiben, dass sich bei müden und ermüdeten Personen Phasen normaler Leistungsfähigkeit mit kurzen Phasen solcher reduzierten Leistungsfähigkeit (engl. lapses in performance) abwechseln können. Langfristig führt Müdigkeit zu einem Anstieg der Variabilität der Leistung. Die Phasen der reduzierten Leistungsfähigkeit werden häufiger und sind zum Beispiel durch das Verpassen von relevanten Reizen aus der Umgebung geprägt.

Auch spezifisch für den Bereich der Fahrzeugführung ist Müdigkeit schon lange als Risikofaktor bekannt. Die Reduzierung von Aufmerksamkeit, längere Reaktionszeiten, Gedächtnisprobleme, schlechtere psychomotorische Koordination, ineffizientere Informationsverarbeitung und verringerte Aufgabenmotivation können den Fahrer in der Ausführung der Fahraufgabe behindern und kritische Folgen für die Steuerung des Fahrzeugs und die Wahrnehmung von Risiken im Straßenverkehr haben. Im Folgenden werden zunächst Ursachen und begünstigende Faktoren für die Entstehung von Fahermüdigkeit dargestellt. Folgen von Fahermüdigkeit in Bezug auf die Qualität der Fahrzeugführung, sowie der Zusammenhang von Fahermüdigkeit und das Entstehen von Unfällen werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

2.2.1. Einflussfaktoren auf die Entstehung von Fahrermüdigkeit

Unter Fahrermüdigkeit soll im Folgenden die verminderte Wachheit verstanden werden, die aus der Belastung des Fahrers durch die Fahraufgabe in Kombination mit der Leistungsfähigkeit des Fahrers auf Grundlage seiner persönlichen Eigenschaften und seiner Schlafquantität-/Qualität entsteht. Zusammengefasst sind die hauptsächlichen Gründe für die Entstehung von Fahrermüdigkeit demnach die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Konzepte Schlafmangel/Schlafqualität, circadianer Rhythmus (Tageszeit) und time-on-task (Dauer der Fahrt) (vgl. Brown, 1994).

Nach Brown (1994) sind die primären Ursachen von Fahrermüdigkeit im realen Straßenverkehr irreguläre und lange Arbeitszeiten. In Fahrsimulatoren lässt sich die Entstehung von Müdigkeit beim Fahren besonders kontrolliert nachvollziehen und ist vor allem für die Probanden frei von realen Risiken. So fanden zum Beispiel Skipper und Wierwille (1986) im Simulator sowohl Effekte von time-on-task als auch Effekte von Schlafmangel auf die Entwicklung von Müdigkeit im Fahrzeug. Beide Faktoren begünstigten die Entstehung von Müdigkeit beim Fahren.

Zusätzlich zu diesen externen Faktoren der Fahraufgabe haben einige Autoren individuelle Eigenschaften von Fahrern als relevant für die Entwicklung von Müdigkeit beim Fahren identifiziert. Diese individuellen Eigenschaften von Fahrern wirken zusammen mit den primären Faktoren Schlafmangel, Tageszeit und Dauer der Fahrt und können die Entstehung von Müdigkeit allgemein begünstigen oder beschleunigen. Solche individuellen Eigenschaften können das Alter des Fahrers, die Fahrerfahrung, die Fitness des Fahrers (inklusive Schlafstörungen und anderen Krankheiten), die Persönlichkeit des Fahrers oder das Einnehmen von Drogen beinhalten. So konnte zum Beispiel van Winsum (1999) zeigen, dass junge und alte Fahrer bei langen Fahrten zwar ähnlich schnell müde wurden, diese Müdigkeit sich aber bei den älteren Fahrern stärker auf die Spurhaltegüte auswirkte. Ähnliche Effekte diskutiert Groeger (2006), der zusammenfasst, dass sowohl ältere Fahrer (70+) als auch jüngere Fahrer sowie Fahrer mit schlechter körperlicher Kondition besonders anfällig für Fahrermüdigkeit sind.

Einen Einfluss der Persönlichkeit auf die Entwicklung von Fahrermüdigkeit fanden unter anderem Verwey und Zaidel (2000) sowie Thiffault und Bergeron (2003). Extravertierten Fahrern und sogenannten "high sensation seekers" – also Personen, die immer auf der Suche nach neuen Erlebnissen und Erfahrungen sind – wurden in diesen Studien mehr Fahrfehler mit zunehmender Müdigkeit nachgewiesen als Fahrern, die nicht diesem Persönlichkeitsprofil entsprachen. Eine tiefergehende Diskussion der individuell beeinflussenden Attribute für die Entwicklung von Müdigkeit würde in diesem Bericht zu weit führen, daher seien diese Studien hier nur als Beispiele genannt. In den oben genannten Studien wird aber auch bereits deutlich, dass die Entwicklung von Müdigkeit bei Fahrern einen Einfluss auf die Qualität der Fahrzeugführung und auf die Sicherheit beim Fahren haben kann. Der folgende Abschnitt stellt bislang bekannte Auswirkungen von Fahrermüdigkeit auf die Qualität der Fahrzeugführung zusammenfassend dar.

2.2.2. Einfluss von Fahrermüdigkeit auf die Qualität der Fahrzeugführung

Fahrermüdigkeit kann die Qualität der Fahrzeugführung negativ beeinflussen. Fahrer können sich mit zunehmender Müdigkeit schlechter auf die Fahraufgabe konzentrieren, in der Konsequenz entstehen immer häufiger Fahrfehler, die außerdem immer schlechter kompensiert werden können. O'Hanlon und Kelley konnten bereits 1977 zeigen, dass das Lenken des Fahrzeugs mit zunehmender subjektiver Müdigkeit immer ungenauer wird. Auch

Riemersma et al. (1977) fanden ähnliche Probleme mit der Steuerung des Fahrzeugs nach einer langen Nachtfahrt. Probanden in dieser Studie hielten die Spur schlechter und drifteten häufiger in Richtung der Fahrbahnbegrenzungen. Auch neuere Studien wie zum Beispiel van der Hulst, Meijman und Rothengatter (2001) und Åkerstedt et al. (2005) fanden Effekte einer schlechteren Spurhaltequalität nach langen Fahrten bzw. Fahrten mit müden Fahrern im Fahrsimulator. Van der Hulst et al. (2001) diskutieren allerdings, dass bei solchen langen Fahrten zwar die Qualität von weniger wichtigen Teilen der Fahraufgabe (zum Beispiel Spurhalte-Genauigkeit) reduziert wird, Fahrer aber bis zu einem gewissen Grad von Müdigkeit weiterhin in der Lage sind, auf kritische Situationen zu reagieren und Unfälle zu vermeiden.

In dieser Studie finden sich jedoch auch Hinweise darauf, dass die Teilnehmer Strategien verwendeten, um die Effekte ihrer zunehmenden Müdigkeit auszugleichen. So korrelierte zum Beispiel die Müdigkeit der Fahrer mit der Wahl des Abstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen. Müde Fahrer berichteten außerdem von subjektiv zunehmender mentaler Beanspruchung, um ein gleichbleibendes Niveau von Aufmerksamkeit zu erhalten. Dass die Wahl des Abstands und die Variabilität des Abstands zum Vorderfahrzeug ein valides Maß für die Leistung bei der Fahraufgabe sein kann, zeigten beispielsweise Brookhuis, de Waard und Mulder (1994), die auf dieser Grundlage einen Test für die Beeinträchtigung von Fahrern durch Alkohol und Nebenaufgaben entwickelt haben.

Eine ähnliche Verhaltensanpassung wie die Wahl des Abstands zum Vorderfahrzeug wurde auch schon hinsichtlich der Wahl der Geschwindigkeit beobachtet. Müde Fahrer scheinen als kompensatorische Strategie zu versuchen, durch schnelleres Fahren nach einer längeren Fahrtzeit durch mehr sensorischen Input Müdigkeit zu vermeiden (Hargutt, Hoffmann, Vollrath & Krüger, 2000).

Häufig werden die Effekte von Müdigkeit beim Fahren mit den Effekten von alkoholisiertem Fahren verglichen, auch um die Schwere der Beeinträchtigungen durch Müdigkeit deutlich zu machen. So fanden Williamson und Feyer (2000), dass Personen nach einer Wach-Zeit von 17 Stunden vergleichbare Leistungseinbußen beim Fahren hatten wie Fahrer mit einem Blutalkohol von 0.5 Promille. Bereits nach 24 Stunden ohne Schlaf waren die Leistungseinbußen vergleichbar mit einem Blutalkohol von 1 Promille – und damit weit oberhalb der Promillegrenze in Deutschland. Hier konnte also gezeigt werden, dass schon Schlafdefizite, die nach nur einer Nacht mit zu wenig oder schlechtem Schlaf entstehen können, zu deutlich messbaren kognitiven und motorischen Beeinträchtigungen beim Fahren führen können.

Eine der messbaren motorischen Beeinträchtigungen, die sowohl beim Fahren unter Alkoholeinfluss als auch bei müden Fahrern beobachtet werden kann, sind langsamere Reaktionszeiten in Notfallsituationen. Dingus (1995) und Philip et al. (2005) führen diese langsameren Reaktionszeiten müder Fahrer auf eine reduzierte Vigilanz zurück, die das Entdecken von relevanten Reizen in der Fahrumgebung beeinträchtigt und mit einer allgemein schlechteren Fähigkeit zur Informationsverarbeitung assoziiert ist.

Das Phänomen reduzierter Vigilanz bei Fahrern findet sich auch in der sogenannten „highway hypnosis“, im deutschen Sprachraum auch als Tunnelblick bezeichnet. Fahrer verbringen in diesem Zustand ganze Streckenabschnitte einer Fahrt ohne ein Bewusstsein für die Strecke oder die umgebenden Verkehrsteilnehmer zu entwickeln. Dieser Zustand, der sich auch ohne Schlafmangel oder time-on-task der Fahrer rein aus der Monotonie einer

Aufgabe entwickeln kann, wird in der Literatur auch als *Driving Without Awareness (DWA)* bezeichnet (Karrer et al., 2005). Typische Symptome einer solchen Fahrt sind, dass Fahrer sich teilweise an ganze Abschnitte der Fahrtstrecke nicht mehr erinnern können und zwischendurch immer wieder Momente des „Aufwachens“ erleben. DWA kann von trainierten Bewertern in Videoaufnahmen von Fahrern erkannt werden, indem Ereignisse wie das Starren der Augen ohne bestimmten Fokus, das Nicken des Kopfes, der Beginn rollender Augenbewegungen und längere Lidschlussdauer kategorisiert und ausgezählt werden. Die Folge von DWA ist eine Zunahme von Fahrfehlern auf verschiedenen Ebenen der Fahraufgabe, sowie eine Abnahme des Situationsbewusstseins während der Fahrt (Briest, Karrer & Schleicher, 2005).

2.2.3. Verkehrsunfälle und Fahrermüdigkeit

Die Frage, wie viele Verkehrsunfälle aus der Übermüdung von Fahrern und den daraus entstehenden Fahrfehlern resultieren, ist nur durch Abschätzungen zu beantworten, da sich häufig im Nachhinein des Unfalls nur noch schwer rekonstruieren lässt, ob der Fahrer müde war bzw. welchen Anteil diese Müdigkeit am Entstehen des Unfalls hatte. Um trotzdem Informationen über den Anteil von Müdigkeits-Unfällen zu erhalten, werden in diesem Forschungsbereich sogenannte „in-depth“ Unfallanalysen durchgeführt. In diesen Analysen wird versucht, den Verlauf des Unfalls anhand aller verfügbaren Daten so genau wie möglich nachzuvollziehen. Aber auch andere Methoden wie Befragungen und „naturalistic driving“ Studien können bei der Abschätzung des Unfallrisikos durch Müdigkeit hinzu gezogen werden. Entsprechend dieser Vielfalt an Methoden gehen die Schätzungen teilweise relativ weit auseinander. Deutlich bleibt jedoch, dass ein wichtiger Anteil an Unfällen, besonders in der Nacht, auf Fahrermüdigkeit zurückzuführen ist. Im Folgenden werden einige Abschätzungen zum Zusammenhang zwischen Fahrermüdigkeit und Verkehrsunfällen kurz vorgestellt.

Eine Analyse im Auftrag der EU aus dem Jahr 2009 gelangte zu der Einschätzung, dass zwischen 10% und 20% der Unfälle auf europäischen Straßen direkt oder indirekt auf Müdigkeit zurückzuführen sind (SafetyNet, 2009). Zu einer ähnlich hohen Einschätzung gelangte im Jahr 1994 bereits eine deutsche Studie von Langwieder und Sporer (1994). Die Autoren schätzten auf der Grundlage von In-depth Analysen von Unfällen auf bayrischen Autobahnen, dass 24% der Unfälle mit Getöteten auf deutschen Autobahnen im Zusammenhang mit Müdigkeit geschehen. Camkin (1990) schätzt die Häufigkeit von durch Fahrermüdigkeit bedingten Unfällen auf 20-30%, die Autoren Evers und Auerbach (2005) erhöhen diese Schätzung noch weiter für Unfälle, die während Nachtfahrten passieren: Für diesen Zeitraum vermuten die Autoren einen Anteil von 42% der Verkehrsunfälle, die im Zusammenhang mit Müdigkeit entstehen. Teilweise wird auch versucht, anstatt einer Abschätzung des Anteils an Unfällen im Zusammenhang mit Müdigkeit die Erhöhung des Unfallrisikos durch Müdigkeit zu beziffern. Abschätzungen rangieren hier zwischen einer Erhöhung des Unfallrisikos um den Faktor 4 (Klauer et al., 2006), um den Faktor 5 bei weniger als 5 Stunden Schlaf (Stutts et al., 2003) um den Faktor 8 (Connor et al., 2001) bis zum Faktor 14 (Cummings et al., 2001).

Zusätzlich wird versucht, durch Fahrermüdigkeit entstehende Unfälle zu charakterisieren. Unfälle mit Fahrermüdigkeit passieren auf Grundlage der verfügbaren Literatur demnach hauptsächlich nachts (z.B. Åkerstedt, 1993), nach langen Fahrtauern (z.B. Hamelin, 1987) und in monotonen Fahrumgebungen (z.B. Horne & Reyner, 1995). Unfälle im Zusammenhang mit Müdigkeit sind hierbei fast immer schwere Unfälle, bei denen der Fahrer alleine gefahren ist. Im Nachhinein lässt sich häufig feststellen, dass der Fahrer von der

Straße abgekommen ist und vor dem Unfall nicht oder nur wenig gebremst wurde (vgl. Dinges, 1995; Lyznicki et al., 1998; SafetyNet, 2009). Weitere typische Merkmale von Müdigkeitsunfällen sind hohe Geschwindigkeiten und das Auffahren auf andere Fahrzeuge (Pack et al., 1997).

2.2.4. Messung von Fahrermüdigkeit

Um Risiken durch Fahrermüdigkeit einschätzen zu können, muss diese Müdigkeit messbar gemacht werden. Ansätze hierzu stützen sich sowohl auf subjektive Befragungen von Fahrern, in denen Müdigkeit selbst eingeschätzt werden soll, als auch auf objektive Methoden, durch die Fahrer entweder von geschulten Müdigkeits-Bewertern eingestuft oder von Computeralgorithmen anhand physiologischer Maße wie zum Beispiel Augenbewegungen und EEG-Messungen bewertet werden. Sowohl Selbsteinschätzungen als auch Bewertungen von Verhaltensmaßen/physiologischen Maßen können zum Erkenntnisgewinn über den Grad der Müdigkeit beim Fahren beitragen. Es sollten also optimaler Weise zur validen Einschätzung der Müdigkeit eines Fahrers immer beide Maße erhoben und ausgewertet werden (Lal & Craig, 2000).

Die wohl am häufigsten verwendete Methode zur Bewertung der subjektiven Müdigkeit ist die Karolinska Sleepiness Skala (Åkerstedt & Gillberg, 1990). Diese Skala wurde anhand von Korrelationen mit verschiedenen physiologischen Daten validiert (z.B. EEG und Augenbewegungen in Åkerstedt & Gillberg, 1990; EEG und psychomotorische Leistungsfähigkeit in Kaida et al., 2006). Gerade im Bereich der Bewertung von Fahrermüdigkeit hat sich die Karolinska Sleepiness Skala als ein hilfreiches Instrument etabliert und ist in verschiedenen Studien verwendet worden, um zusätzlich zu objektiven Maßen einen Eindruck von der subjektiv wahrgenommenen Müdigkeit von Autofahrern zu erhalten (z.B. Horne & Reyner, 1996; Kecklund & Åkerstedt, 1993; Ingre et al., 2006).

Menschen scheinen also grundsätzlich in der Lage zu sein, ihre eigene Müdigkeit einzuschätzen. Allerdings weisen einige Studien darauf hin, dass die Auswirkungen dieser subjektiven Müdigkeit auf die eigene Leistungsfähigkeit in verschiedenen Aufgaben nur unzureichend vorhergesagt werden kann (Dorrian et al., 2003; Rogers, Dorrian & Dinges, 2003). Subjektive Müdigkeitsschätzungen sollten also durch objektive Schätzungen ergänzt werden. Eine effektive und effiziente Möglichkeit, solche genaueren Schätzungen zu erhalten, sind Beobachtungsverfahren, die geschulte Müdigkeits-Bewerter einsetzen, um verschiedene Abstufungen von Müdigkeit zu erkennen (Dittrich, Brandenburg & Thüning, 2009).

Geschulte Müdigkeits-Bewerter verwenden verhaltensbasierte Indikatoren von Müdigkeit zur Einschätzung von Fahrermüdigkeit. Dazu gehören zum Beispiel der Muskeltonus im Gesicht des Fahrers, der Gesichtsausdruck des Fahrers, die Geschwindigkeit und Dauer mit der der Fahrer blinzelt und typische „Ticks“ (engl. mannerisms), wie das Reiben des Gesichts und Gähnen. Diese zeigen Fahrer mit zunehmender Müdigkeit häufiger (Belyavin & Wright, 1987). Die Autoren Wierwille und Ellsworth (1994) entwickelten auf der Grundlage solcher verhaltensbasierter Indikatoren eine Skala, die die Einstufung von beobachteter Müdigkeit auf vier Stufen erlaubt. Hierbei erstreckt sich die Skala von Stufe 0 (nicht müde, u.a. kurze Lidschlüsse, normales Blickverhalten) bis zu Stufe 5 (extrem müde, u.a. Sekundenschlaf mit Lidschlüssen von >2 Sekunden, Hochschrecken). Diese Methode zur Einschätzung der Müdigkeit durch geschulte Müdigkeits-Bewerter ist in verschiedenen Studien erfolgreich eingesetzt worden, (Muttray et al., 2007; Vöhringer-Kuhnt et al., 2004) und scheint eine hohe

Konsistenz der Bewertungen zwischen verschiedenen Bewertern zu erzielen (Dittrich, Brandenburg & Thüring, 2009).

Um Müdigkeits-Bewerter zu schulen, wurden in den ursprünglichen Experimenten von Wierwille und Ellsworth (1994) schriftliche Beschreibungen der beobachtbaren Symptome von Müdigkeit in den verschiedenen Müdigkeits-Stufen gegeben, die die Beobachter verinnerlichen mussten. Wiegand et al. entwickelten im Jahr 2009 eine Alternative zu dieser Methode der Bewerter-Schulung, die auf Videoausschnitten aus naturalistic driving Studien aufbaut. Den Bewertern wurden hier vor der Studie, zusätzlich zu den Beschreibungen der Müdigkeits-Stufen, Videoausschnitte von müden Fahrern gezeigt, die die spezifischen Indikatoren für die jeweiligen Müdigkeits-Stufen beinhalten. Hierdurch konnten die Bewerter während des Trainings erfolgreich lernen, auch subtilere Abstufungen der Müdigkeit zu erkennen und anhand von objektiven Verhaltensindikatoren einzuordnen.

Im Fahrzeugbereich werden zusätzlich zu solchen Beobachtungsdaten häufig auch Fahrdaten ausgewertet, um Hinweise auf zunehmende Müdigkeit zu erhalten. Solche Methoden nutzen zum Beispiel aktuelle Assistenzsysteme in Fahrzeugen von Ford (*Driver Alert*) und Mercedes (*Attention Assist*), aber auch von anderen Herstellern, um Fahrer auf eine Veränderung ihres Fahrverhaltens aufmerksam zu machen. Diese Systeme nutzen die Tatsache, dass sich typische Parameter des Fahrerverhaltens im Zusammenhang mit Müdigkeit verändern. Parameter, die von Müdigkeit beeinflusst sind, sind u.a. die Lenkbewegungen, das Geschwindigkeits- und Bremsverhalten, die Spurhaltegüte und der Abstand zum Vorderfahrzeug (Knippling & Wierwille, 1994).

So lässt sich beispielsweise an der Lenkung bei ermüdeten Fahrern eine höhere Anzahl kleiner Korrekturbewegungen feststellen. Gleichzeitig werden Lenkeingaben insgesamt langsamer und es entsteht eine höhere Variabilität des Lenkverhaltens (Hartley et al., 2000). Wierwille und Muto (1981) fanden außerdem, dass die Standardabweichung der Spurposition (Standard Deviation of Lane Position, SDLP) mit ansteigender Müdigkeit zunahm. Fairclough (1997) stellte eine höhere Variabilität der Geschwindigkeit bei zunehmend müde werdenden Fahrern fest.

Auch physiologische Maße lassen sich im Fahrzeugbereich nutzen, um Fahrermüdigkeit zu erkennen und zu quantifizieren. Besonders gut scheint sich Müdigkeit aus den Augen der Fahrer ablesen zu lassen. Entsprechend viele Methoden existieren, die hier ansetzen. Weeß et al. (2000) und Wilhelm et al. (2004) schlagen zum Beispiel pupillographische Tests vor, die die Schläfrigkeit von Testpersonen einschätzen können. Ein hierauf basierendes Maß ist der Pupillenunruheindex (z.B. Weeß et al., 2000), der Schwankungen der Pupillenweite über einen Zeitraum zu einem Index für Müdigkeit zusammenfasst.

Auch die Lidschluss-Charakteristik eines Menschen lässt sich als physiologisches Maß für Müdigkeit verwenden. Wierwille et al. schlugen bereits 1994 das sogenannte PERCLOS Maß vor, das den Anteil der Zeit bestimmt, während der die Augen der Fahrer während einer müden Fahrt zu mindestens 80% vom Augenlied verdeckt waren. Lal und Craig (2000) fassen zusammen, dass grundsätzlich schnelle Augenbewegungen und kurzes Blinzeln auf einen wachen Fahrer hindeuten, wohingegen wenige und langsame Augenbewegungen („Starren“) sowie häufiges, schnelles und rhythmisches Blinzeln auf müde Fahrer schließen lässt.

Weitere physiologische Maße, die im Fahrzeugbereich Anwendung gefunden haben, sind die Ableitung der Gehirnaktivität über EEG sowie die Ableitung der Herzaktivität über das EKG. Im EEG werden Verschiebungen im Frequenz- und Powerspektrum als Hinweise auf Müdigkeit gedeutet (z.B. Lal & Craig, 2001; Lin et al., 2005). Im EKG deutet eine Verringerung der Herzfrequenz auf Müdigkeit hin (z.B. Riemersma et al., 1977; Lal & Craig, 2000).

2.2.5. Gegenmaßnahmen für Fahrermüdigkeit

Allgemein lässt sich zunächst festhalten, dass die einzig dauerhaft wirksamen Maßnahmen gegen Fahrermüdigkeit ausreichend Schlaf und eine ausreichende Anzahl von Fahrpausen sind. Daher ist immer der Fahrer selbst aufgefordert, auf die Vermeidung von Müdigkeit am Steuer zu achten. Es wurden jedoch verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, die dem Fahrer helfen können, ein Bewusstsein für Müdigkeit zu entwickeln und rechtzeitig Pausen einzulegen. Diese Maßnahmen lassen sich grob kategorisieren als fahrerbezogene Müdigkeitswarner und „fit-for-duty“ Tests, verkehrsbezogene Kontrollmaßnahmen und Kampagnen zur Förderung des öffentlichen Bewusstseins für die Risiken von Müdigkeit am Steuer.

Diverse Fahrzeughersteller bieten inzwischen in ihren Fahrzeugen Müdigkeitswarner als Assistenzsystem an (z.B. „Attention Assist“ der Daimler AG). Diese Warnsysteme überwachen das Fahrerverhalten und vergleichen es mit einer vorab erhobenen Baseline. Diese Assistenzsysteme basieren aktuell zu einem Großteil auf dem Lenkverhalten des Fahrers und können zumindest größere Abweichungen im Lenkverhalten des Fahrers, die mit Müdigkeit assoziiert sind, erkennen (weniger Korrekturbewegungen, größere Lenkkorrekturen; Evers & Auerbach, 2005). In Reviews zu verfügbaren Müdigkeitswarnsystemen für das Fahrzeug wird teilweise bemängelt, dass solche Systeme nur Fahrer-Leistungsparameter oder Fahrer-Zustandsparameter erfassen (Williamson & Chamberlain, 2005; Wright et al., 2007). Für ein erfolgreiches Erkennen von Fahrermüdigkeit sei jedoch eine Kombination aus diesen beiden Parametern zielführender.

Ein Forschungsbericht des AWAKE-Projekts geht in einer Einschätzung davon aus, dass ca. 50% aller Müdigkeits-Unfälle durch den Einsatz von Müdigkeitswarnern im Fahrzeug vermieden werden könnten (eSafety Forum, 2005). Einige Autoren warnen jedoch auch, dass der Einsatz solcher Systeme Fahrer dazu verleiten könnte, sich zu stark auf die Systeme zu verlassen. Fahrer würden dann Müdigkeitswarner nutzen, um sich länger wach zu halten, anstatt sinnvolle Fahrpausen einzulegen (z.B. Sagberg, 1999).

Viele Bemühungen zur Bekämpfung von Müdigkeit am Steuer fokussieren daher weniger auf Assistenzsysteme für den Fahrer, sondern vielmehr auf die Sensibilisierung der Fahrer für Müdigkeit sowie auf die Einführung von straßenbaulichen Maßnahmen (sogenannte „Rüttelstreifen“), die das Abkommen von der Spur verhindern sollen (siehe z.B. Verkehrssicherheitsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2011). Auch in anderen Ländern wird häufig versucht, eine Sensibilisierung der Fahrer für die Gefahren von Müdigkeit am Steuer zu erreichen, sowie rechtlich gültige Grenzwerte für müdes Fahren festzulegen, deren Einhaltung von den zuständigen Behörden kontrolliert werden kann (z.B. Fletcher et al., 2005).

2.3. Fahrermüdigkeit als Risikofaktor bei automatisierten Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme sollen das Autofahren erleichtern und sicherer machen. In diesem Zusammenhang nehmen sie dem Fahrer (Teil-)Aufgaben der Fahrzeugführung ab, setzen ihn dann jedoch häufig als Überwacher des Assistenzsystems ein. Im ersten Teil dieses Forschungsberichts (Vogelpohl et al., 2016) wurde bereits deutlich, dass die Automation von Fahraufgaben Probleme mit sich bringen kann. Durch Automation kann sich das Situationsbewusstsein des Fahrers reduzieren und der Fahrer „out-of-the-loop“ genommen werden. Außerdem kann sich ein zu starkes Vertrauen des Fahrers in die Automation entwickeln. Hierdurch werden Entscheidungen und Handlungen der Automation nicht hinterfragt („Complacency“) und bei einem plötzlichen Wechsel der Verantwortlichkeit zurück zum Fahrer können kritische Situationen nicht ausreichend präzise eingeschätzt werden. Als besonders kritische Automationseffekte im Zusammenhang mit automatisierten Fahrfunktionen werden allgemein das Nachlassen der Daueraufmerksamkeit (Vigilanz-Dekrement, Parasuraman & Davies, 1977), der Verlust des Situationsbewusstseins (Kaber et al., 2006), Mode Confusion/Mode Error (Degani et al., 1999) und das Out-of-the-loop Performance Problem (Endsley & Kiris, 1995) bewertet.

Diese Effekte führen auch bei dem Übergang vom automatisierten Fahren zurück zur manuellen Steuerung teilweise zu Schwierigkeiten und Verzögerungen. In Vogelpohl et al. (2016) konnten wir zeigen, dass Fahrer die Automation nach einer Übernahmeaufforderung während einer hochautomatisierten Fahrt mit starker Ablenkung zwar relativ schnell abschalten konnten (90% der Fahrer nach ca. 7-8 Sekunden), das Bewusstsein dieser Fahrer für ihre Fahrumgebung jedoch im Vergleich zu den manuellen Fahrern noch für weitere ca. 5 Sekunden beeinträchtigt war. Für eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse zur Dauer der Übernahme der Steuerung in Abhängigkeit von verschiedenen Nebentätigkeiten während einer automatisierten Fahrt verweisen wir auf den ersten Teil dieser Studienreihe (Vogelpohl et al., 2016).

In unserer vorangegangenen Studie fuhren Fahrer eine relativ kurze Strecke mit aktiver Automation (ca. 5 Minuten Fahrtzeit vor der Übernahmeaufforderung). Fahrermüdigkeit konnte demnach in dieser Studie bei den manuellen Fahrern und vermutlich auch bei den automatisiert fahrenden Fahrern noch nicht auftreten. Einige Studien vermuten jedoch gerade einen Einfluss der Fahrdauer (Feldhütter et al., 2016) und des Fahrerzustands (z.B. Merat et al., 2012) auf das Verhalten der Fahrer in der Interaktion mit der Automation. Automation im Fahrzeug könnte die Entstehung von Müdigkeit begünstigen und den Übergang vom automatisierten Fahren zur manuellen Steuerung für die Fahrer erschweren. Einige Autoren weisen aber auch darauf hin, dass Fahrer automatisierte Fahrfunktionen sogar über längere Zeiträume passiv überwachen können, wenn sie während dieser Zeit die Möglichkeit haben, einfachen Nebentätigkeiten nachzugehen und angemessene Rückmeldungen des Assistenzsystems über die Sicherheit und den Zustand der Automation zur Verfügung gestellt bekommen (Jamson et al., 2013; Miller et al., 2015).

Miller et al. (2015) fanden in Ihrer Fahrsimulations-Studie, dass Fahrer nach zwei bzw. drei automatisierten Fahrabschnitten vermehrt Anzeichen von Fahrermüdigkeit zeigten, wenn sie nicht durch eine aktivierende Nebenaufgabe abgelenkt waren. Die Fahrabschnitte, an deren Ende jeweils Transitionen zurück zum manuellen Fahren stattfanden, dauerten in dieser Studie ca. 8 Minuten. Die Autoren diskutieren, dass bei einem Fahrer in einem automatisiert fahrenden Fahrzeug möglicherweise Ablenkung durch aktivierende Nebenaufgaben zu

einem besseren Aufbau des Situationsbewusstseins bei der Rückkehr zur manuellen Steuerung beitragen kann im Vergleich zu der Leistung eines stark ermüdeten oder schlafenden Fahrers in der gleichen Situation. Daher sollte der Fokus der Entwicklung auf der gezielten Aufrechterhaltung und Steuerung der Aufmerksamkeit des Fahrers während der Fahrt liegen, um in Übernahme-situationen angemessene Handlungsweisen hervorzurufen:

„Managing visual media so to make transitions safer may be a solution, if mechanisms are in place to help the driver switch back to driving, both physically and mentally, from non-driving activities“ (Miller et al., 2015, S. 1679).

Dieses „Management“ von Nebenaufgaben und Fahreraufmerksamkeit für eine optimale Fahrer-Verfügbarkeit im Falle einer Transition von automatisierter Fahrt zurück zu manueller Fahrt gewinnt vor dem Hintergrund einer Studie von Neubauer et al. (2012) noch weiter an Kritikalität. Die Autoren konnten in Ihrer Studie zeigen, dass Fahrer bei längeren automatisierten Fahrten besonders anfällig für Fahrermüdigkeit sind, aber gerade im ermüdeten Zustand häufiger freiwillig die Automation als Alternative zur manuellen Steuerung des Fahrzeugs wählen. In der Folge konnten automatisiert fahrende Fahrer in dieser Studie nach einer Übernahmeaufforderung schlechter auf ein kritisches Ereignis reagieren als manuelle Fahrer.

Auch in der Studie von Körber et al. (2015) konnten die Autoren auf der Grundlage von Pupillenweite, Lidschluss-Frequenz und Lidschluss-Dauer einen signifikanten Anstieg der Müdigkeit während einer automatisierten Fahrtdauer von 42 Minuten feststellen. Aufbauend auf dieser Studie fanden Goncalves, Happee und Bengler (2016), dass Versuchsfahrer sich sogar nach einer automatisierten Fahrtdauer von weniger als 15 Minuten als subjektiv müde bewerteten. Auch Feldhütter et al. (2016) fanden nach einer automatisierten Fahrt von 20 Minuten Indikatoren für die verstärkte Entwicklung von Müdigkeit basierend auf Blickbewegungsmaßen. Zusätzlich wurden in dieser Studie bei müden Fahrern langsamere Reaktionszeiten auf eine Übernahmeaufforderung festgestellt, die sich hier jedoch nicht auf die Qualität der Übernahme auswirkte.

Die Dauer einer automatisierten Fahrt wurde somit zunächst unabhängig von der physiologischen Müdigkeit der Fahrer in automatisierten Fahrzeugen als Risikofaktor für die Entwicklung von Fahrermüdigkeit identifiziert. Kommt zu dieser Dauer der automatisierten Fahrt noch Schlafmangel der Fahrer hinzu, so lassen sich noch deutlichere Effekte von Automation auf die Entwicklung von Müdigkeit sowie auf die Leistung in Übernahme-situationen erwarten. In der im Folgenden vorgestellten Studie wurde der Einfluss der Dauer einer automatisierten Fahrt sowie der Einfluss von verminderter Schlafdauer in der vorangegangenen Nacht auf die Entwicklung von Müdigkeit während der Fahrt sowie auf die Dauer und Qualität der Übernahme der Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung analysiert.

3. Studie: Müdigkeit und lange Fahrtdauer als Einflussfaktoren auf die Sicherheit nach einer Übernahmeaufforderung

Bislang zeigen nur wenige Studien, wie die Dauer der Fahrt und die Müdigkeit des Fahrers die Interaktion mit hohen Stufen der Fahrzeugautomatisierung beeinflusst. Es wird vermutet, dass die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Effekte von Fahrermüdigkeit ihre Relevanz für die Sicherheit im Straßenverkehr auch in teil- oder hochautomatisierten Fahrzeugen (Gasser et al., 2012, bzw. SAE, 2014) nicht verlieren. Solange der Fahrer als Rückfallebene für Situationen eingesetzt werden soll, die vom Fahrzeug nicht gehandhabt werden können bzw. solange hochautomatisiertes Fahren nur auf bestimmten Streckenabschnitten verfügbar ist, wird es Kontrollübergaben vom Fahrzeug an den Fahrer geben. In solchen Situationen ist der Fahrer darauf angewiesen, nicht nur möglichst schnell wieder die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, sondern auch möglichst schnell ein vollständiges Bewusstsein für die Verkehrssituation und den Zustand des Fahrzeugs aufzubauen. Müde oder ermüdete Fahrer nach Phasen der Automation könnten in solchen Situationen genauso oder sogar stärker beeinträchtigt sein wie Fahrer in manuellen Fahrzeugen.

Zusätzlich von Interesse ist die Entwicklung der Müdigkeit des Fahrers in der Interaktion mit der Nutzung von Automation. Erste Hinweise deuten darauf hin, dass Fahrer in Zusammenarbeit mit Automation schneller ermüden und das dauerhafte Aufrechterhalten von Aufmerksamkeit in einer monotonen Fahrumgebung eventuell sogar anstrengender ist als bei einer manuellen Fahrt. Müde Fahrer könnten sich in der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen anders verhalten als Fahrer im wachen Zustand und möglicherweise die Überwachung von Funktionen vernachlässigen oder bestimmte Hinweisreize auf potentiell gefährdende Situationen verpassen.

Hier besteht aktuell noch deutlicher Forschungsbedarf, um alle möglichen Szenarien abzudecken und automatisierte Fahrfunktionen so abzusichern, dass auch in Extremfällen, wie zum Beispiel dem Einschlafen des Fahrers, noch eine ausreichende Sicherheit für den Fahrer und für andere Verkehrsteilnehmer gewährleistet ist. Ein erster wichtiger Schritt in diese Richtung scheint die standardisierte Quantifizierung von Fahrermüdigkeit in Abhängigkeit von relevanten Parametern der Fahrsituation und des Fahrerzustands zu sein. Die Überwachung des Fahrerzustands hinsichtlich Ablenkung, die bereits in Vogelpohl et al. (2016) als Grundlage eines sicheren Übergangs von Fahrzeugkontrolle zu Fahrerkontrolle gefordert wurde, könnte sich auch im Zusammenhang mit Müdigkeit als wichtiger Baustein für eine sichere Fahrzeugautomation erweisen.

Vor diesem Hintergrund wurde die nachfolgend vorgestellte Fahrsimulator-Studie an der TU Braunschweig im Jahr 2016 durchgeführt, um einige der als relevant identifizierten Parameter gezielt zu untersuchen. Ziel der Studie war eine Quantifizierung der Müdigkeit bei Fahrern in hochautomatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu manuellen Fahrern. Jeweils für Fahrer mit leichtem Schlafmangel und für Fahrer ohne Schlafmangel wurde Müdigkeit gemessen. Außerdem wurden in Abhängigkeit von diesen Variablen Übernahmeaufforderungen an den Fahrer ausgegeben und die Dauer und Qualität der Reaktionen auf Übernahmeaufforderungen und nachfolgende kritische Ereignisse analysiert.

3.1. Fragestellungen und Versuchsdesign

Die Forschungsfragen für diese Untersuchung waren:

- Wie wirkt sich eine lange hochautomatisierte Fahrt (ca. 1 Stunde) auf die Geschwindigkeit und Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt aus? Wie reagieren automatisiert fahrende Fahrer in so einer Situation im Vergleich zu manuellen Fahrern nach der gleichen Fahrdauer?
- Wie wirkt sich Schlafmangel bei Fahrern auf die Geschwindigkeit und Qualität der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Phase der hochautomatisierten Fahrt aus? Wie reagieren automatisiert fahrende Fahrer in so einer Situation im Vergleich zu manuellen Fahrern?
- Wie verläuft die Entwicklung von Fahrermüdigkeit bei Fahrern in hochautomatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu manuellen Fahrern? Hängt diese Entwicklung von Müdigkeit mit der Dauer der Fahrt und/oder einem vorab induzierten Schlafmangel der Fahrer zusammen?

Zur Untersuchung dieser Forschungsfragen wurde ein Versuchsplan verwendet, der die zwei Einflussfaktoren *Art der Fahrermüdigkeit* (mit den Stufen „Dauer der Fahrt“ und „Schlafmangel“) sowie *Automation* (mit den Stufen „automatisierte Fahrt“ und „manuelle Fahrt“) enthält. Um die Art der Fahrermüdigkeit zu variieren, wurde eine Gruppe von Testpersonen instruiert, in der Nacht vor dem Versuch ausreichend zu schlafen. Außerdem wurden sie tagsüber untersucht. In dieser Gruppe sollte Müdigkeit durch die Dauer der Fahrt („time-on-task“) entstehen. In der zweiten Gruppe wurden die Fahrer instruiert, in der Nacht vor dem Versuch wenig zu schlafen. Außerdem wurde der Versuch abends durchgeführt, sodass insgesamt davon auszugehen war, dass diese Fahrer aufgrund des Schlafmangels und der Tageszeit bereits müde den Versuch begannen und dann zusätzlich die Fahrdauer hinzukam.

Beide Gruppen von Testpersonen wurden jeweils wiederum aufgeteilt in die Versuchsbedingungen „automatisierte Fahrt“ und „manuelle Fahrt“. Da die Entwicklung der Müdigkeit nicht durch Kontrollübergänge zwischen dem Fahrer und der Automation beeinflusst werden sollten und um den Effekt eines Erstkontakts mit einer Übernahmesituation zu erzielen, wurde pro Testperson nur eine Übernahmesituation simuliert, die jeweils am Ende der Fahrt stattfand. Probanden wurden den Versuchsbedingungen und Versuchsgruppen zufällig zugewiesen. Für jede der vier möglichen Versuchsgruppen war eine Stichprobe von ca. 15 Personen geplant. Das grundlegende Versuchsdesign der Studie ist in Tabelle 1 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Teilnehmer in der Versuchsgruppe *Schlafmangel* wurden gebeten in der Nacht vor dem Versuch maximal 5 Stunden zu schlafen. Außerdem wurden Probanden aus dieser Gruppe ausschließlich zwischen 8 Uhr abends und 12 Uhr nachts zu den Versuchen eingeladen. Hierdurch sollte eine müde Heimfahrt von der Arbeitsstelle simuliert werden, wie sie nach einer Nacht mit etwas zu kurzem Schlaf, bzw. schlechter Schlafqualität realistisch vorkommen kann. Im Kontrast zu der Versuchsgruppe *Schlafmangel* wurden Teilnehmer der Versuchsgruppe *Dauer der Fahrt* instruiert in der Nacht vor dem Versuch ausreichend (mindestens 7 Stunden) zu schlafen. Probanden aus dieser Gruppe wurden außerdem ausschließlich zu Versuchszeiten eingeladen zu denen die circadiane Rhythmik eines

gesunden Menschen keine Tiefpunkte haben sollte, also zwischen 9 Uhr und 11 Uhr morgens oder zwischen 15 Uhr und 17 Uhr nachmittags.

Tabelle 1: Darstellung des Versuchsdesigns und der Stichprobenplanung.

Stichproben/Quelle der Müdigkeit	Versuchsbedingung	Anzahl Versuchspersonen
<i>Population 1:</i> Müdigkeit (Schlafmangel + negativer Effekt circadianer Rhythmik)	manuelle Fahrt	15 Personen
	automatisierte Fahrt	15 Personen
<i>Population 2:</i> lange Fahrdauer (Daueraufmerksamkeit + positiver Effekt circadianer Rhythmik)	manuelle Fahrt	15 Personen
	automatisierte Fahrt	15 Personen

3.2. Versuchsaufbau und Methodik

Die Studie wurde im Fahrsimulator der TU Braunschweig durchgeführt. Die Fahrdaten wurden in der Fahrsimulation SILAB (Krueger, Grein, Kaussner und Mark, 2005) in der Version 5 erhoben. Der verwendete Fahrsimulator bestand aus einer Sitzkiste mit Fahrer- und Beifahrersitz, einem Lenkrad und Pedalerie. Die Simulation wurde von drei Beamern auf Leinwände projiziert. Über die Simulation wurden außerdem vier kleine Bildschirme angesteuert, die als Seitenspiegel, Rückspiegel und Geschwindigkeitsanzeige dienten. Fahrgeräusche, Motorgeräusche und Geräusche des umgebenden Verkehrs wurden über ein Sourround-Sound System ausgegeben. Die Konfiguration des Simulator-Raums ist in Abbildung 2 dargestellt.

3.2.1. Gestaltung des Übernahmeszenarios

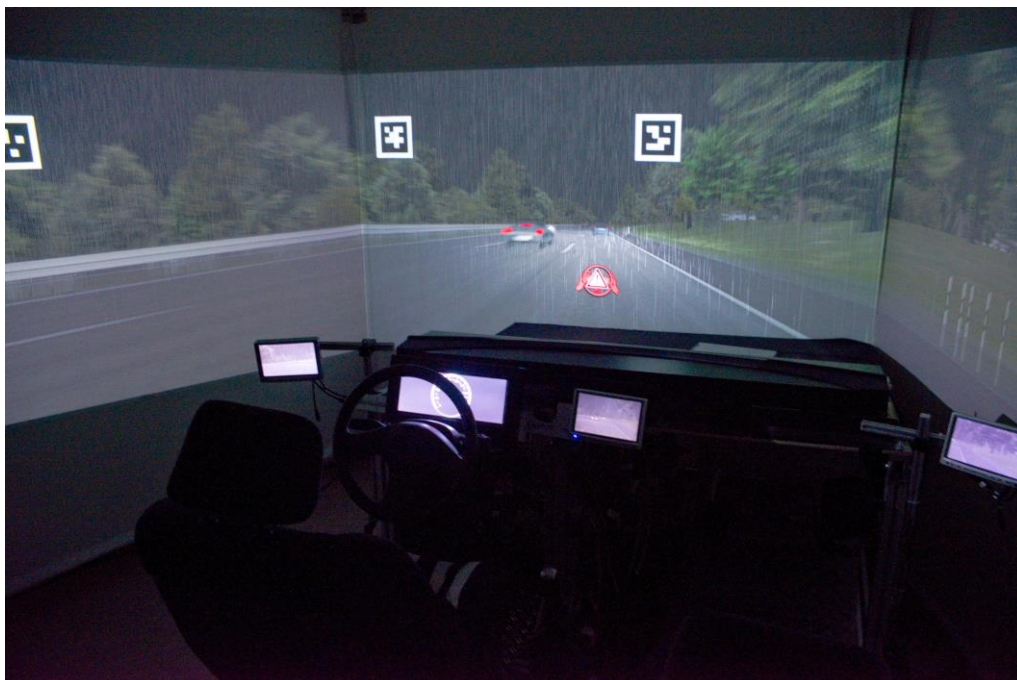





Abbildung 2: Konfiguration der Sitzkiste und des Simulator-Raums (Foto: Matthias Powelleit).

Um die Auswirkungen von Müdigkeit und langer Fahrdauer auf die Fähigkeit zur Übernahme der Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung zu testen, wurden bereits in Teil 1 dieser Studienreihe verschiedene Szenarien entworfen. Grundlage aller entworfenen Szenarien war die Annahme, dass ausschließlich für das Fahrzeug planbare Übernahme-situationen für die Stufe des hochautomatisierten Fahrens relevant sind. Plötzliche Interventionen durch den Fahrer, zum Beispiel beim schnellen Einscheren von vorausfahrenden Fahrzeugen, sind bei diesem Grad der Automation durch den Fahrer nicht mehr zu erwarten und müssen durch das Fahrzeug abgefangen werden.

Vor diesem Hintergrund wurden in Vogelpohl et al. (2016) Experteninterviews durchgeführt, aus denen realistische Szenarien für solche planbaren Übernahme-situationen abgeleitet wurden. Hierzu zählte der Wechsel von einem für Automation freigegebenem Abschnitt zu einem Abschnitt, in dem die Automation nicht verfügbar ist, der Ausfall eines (redundanten) Sensorsystems, fehlende oder schlecht sichtbare Fahrbahnmarkierungen, eine Baustelle sowie Wetterbedingungen, die die Sensorik des Fahrzeugs behindern. Auf Grundlage der Erfahrungen aus dem ersten Studienteil wurde für diese Studie das Szenario ausgewählt, in dem die Wetterbedingungen (einsetzender Starkregen) die Sensorik behindern. Um den Anwendungsfall „Heimfahrt von der Arbeitsstelle nach einer Nacht mit zu wenig Schlaf“ der Versuchsgruppe *Müdigkeit* realistischer zu gestalten, wurde die Simulation für diese Gruppe sowohl in der automatisierten Bedingung als auch in der manuellen Bedingung auf „Nacht“ umgestellt. Hierdurch änderte sich die Beleuchtung der Simulation und alle Fahrzeuge wurden mit aktiven Scheinwerfern dargestellt.

Zeitgleich mit dem einsetzenden Starkregen wurde an die Fahrer in den automatisiert fahrenden Versuchsgruppen eine akustische und visuelle Übernahmeaufforderung ausgegeben. Das Design der Übernahmeaufforderung orientierte sich an der Gestaltung solcher Übernahmeaufforderungen in aktuellen Studien und aktuellen Serienfahrzeugen mit teilautomatisierten Funktionen. Die verwendete Symbolik für die verschiedenen Zustände der Automation ist in Tabelle 2 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2: Mögliche Zustände der Automation und verwendete Symbolik.

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

In der Studie sollte nicht nur die Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung evaluiert werden, sondern auch die Fähigkeit der Fahrer, nach so einer Übernahme auf kritische Verkehrssituationen zu reagieren. Zu diesem Zweck wurde für

jedes Szenario ein realistisches, kritisches Ereignis implementiert, das zeitlich in dem Bereich lag, kurz nachdem die Fahrer die manuelle Steuerung wieder übernommen hatten. Der Ablauf des Übernahmeszenarios wurde analog zum ersten Studienteil beibehalten, um eine Vergleichbarkeit der Reaktionen der Fahrer aus beiden Studien zu ermöglichen.

Für das in dieser Studie verwendete Wetter-Szenario wurde 175 Meter (ca. 5 Sekunden) nach der Übernahmeaufforderung eine starke Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs von 120 km/h auf 80 km/h implementiert. Das vorausfahrende Fahrzeug hatte zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung einen Abstand von ca. 250 Metern zum Ego-Fahrzeug. Hierdurch sollte das Bremsen von vorausfahrenden Fahrzeugen als Reaktion auf den einsetzenden Regen nachgebildet werden. Der Abstand von 5 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung wurde auf Grundlage der verfügbaren Literatur als Zeitraum gewählt, in dem ein Großteil der Fahrer die Automation bereits abgeschaltet hatte (siehe Literaturübersicht in Vogelpohl et al., 2016).

3.2.2. Fähigkeiten der simulierten Automation

Die Fähigkeiten der simulierten Automation waren analog zu den Fähigkeiten der Automation in Vogelpohl et al. (2016). Die Automation entsprach weitestgehend der Stufe *hochautomatisiertes Fahren* nach Gasser et al. (2012), bzw. der Stufe 3 *Conditional Automation* nach SAE (2014). Die Automation war auf eine Geschwindigkeit von 120 km/h eingestellt und versuchte diese Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie des umgebenden Verkehrs zu halten.

Das simulierte Fahrzeug konnte die Spur und den Abstand zu vorausfahrenden Vorderfahrzeugen halten, auf Geschwindigkeitsbegrenzungen reagieren und selbstständig Überholmanöver durchführen, wenn sich ein langsamer fahrendes Fahrzeug in der Spur befand. In den oben spezifizierten Übernahme-Szenarien gab das Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung aus. In dem Fall, dass ein Fahrer 10 Sekunden nach einer Übernahmeaufforderung die Automation noch nicht abgeschaltet hatte, wechselte das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand, indem es die Spur hielt und bis zum Stillstand abbremste, bzw. einem vorausfahrenden Fahrzeug in sicherem Abstand folgte.

3.2.3. Versuchsablauf und Instruktion der Probanden

Die Instruktion der Probanden entsprach weitgehend den Instruktionen aus dem ersten Teil der Studienreihe (Vogelpohl et al., 2016). Entsprechend werden die Instruktionen hier nur noch einmal kurz zusammengefasst und Unterschiede und Ergänzungen im Vergleich zur vorangegangenen Studie vorgestellt. Die Probanden wurden über die Fähigkeiten der simulierten Automation informiert und Ihnen wurde mitgeteilt, dass die Automation 100% aller Situationen, in denen eine Übernahme notwendig wird, korrekt erkennt und in diesen Situationen warnt. Die Probanden lernten während einer Trainingsfahrt von ca. 12 Minuten sowohl das manuelle Fahren im Simulator als auch das Fahren mit aktiver Automation kennen. Hierzu gehörte auch eine Übernahmesituation, in der die Probanden die akustische und visuelle Warnung im Übernahmefall erlebten und den Prozess der Übernahme der Steuerung einmal üben konnten.

Das Aktivieren der Automation erfolgte über den Lenkstockhebel hinter dem Lenkrad. Im Falle einer Übernahmeaufforderung konnten die Fahrer die Automation entweder über das Treten der Bremse oder über den Lenkstockhebel deaktivieren. Die Automation blieb nach einer Übernahmeaufforderung immer so lange aktiv, wie die Probanden die Automation nicht deaktiviert hatten.

Die Probanden wurden gebeten, ihre Mobiltelefone oder sonstige technische Geräte nicht mit in den Simulator zu nehmen. Die Probanden in den automatisiert fahrenden Gruppen wurden dahingehend instruiert, dass sie die Automation nicht dauerhaft überwachen müssten, da im Fall einer Übernahme-situation auf jeden Fall eine Übernahmeaufforderung ausgegeben werden würde. Es wurde den Probanden aber außer der Beobachtung der Fahrsituation keine weitere Möglichkeit zur Beschäftigung oder Ablenkung gegeben. Fahrern in der manuell fahrenden Gruppe wurde eine Erklärung zur Plausibilisierung der Warnung zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung vorgegeben. Den Probanden wurde gesagt, ihr Fahrzeug besäße ein Assistenzsystem, das potentiell kritische Situationen vorhersehen kann und vor solchen Situationen einen Warnton ausgibt.

Die Probanden wurden instruiert, Fragen nach der Menge an Schlaf in der vorangegangenen Nacht wahrheitsgemäß zu beantworten, auch wenn sie die bei der Probandenrekrutierung geforderte Mindestdauer/Maximaldauer an Schlaf nicht erreicht hätten. Den Probanden entstand bei Nicht-Erreichen der geforderten Dauer kein Nachteil hinsichtlich der Probandenvergütung. Probanden in der Gruppe *Müdigkeit* wurden nachrekrutiert, wenn sie länger als 6 Stunden geschlafen hatten. Entsprechend wurden auch Probanden in der Gruppe *lange Fahrtdauer* nachrekrutiert, die kürzer als 7 Stunden geschlafen hatten.

Die Probanden in allen Gruppen wurden gebeten, während der Fahrtzeit außer in Notfällen bzw. beim Auftreten von Übelkeit nicht über die Gegensprechanlage mit den Versuchsleitern zu sprechen und sich vorzustellen, sie seien alleine im Fahrzeug. Hierdurch sollte Ablenkung sowie das Vermeiden von Müdigkeit durch Gespräche vorgebeugt werden. Von den Probanden wurde vor dem Versuch die generelle Erlaubnis eingeholt, Fahrdaten und Videodaten aufzuzeichnen. Den Probanden wurde jedoch nicht explizit erklärt, dass während der Fahrt ihre Müdigkeit über eine auf den Kopf und Oberkörper gerichtete Kamera aufgezeichnet und von den Versuchsleitern bewertet wurde. Weiterhin wurde den Probanden nicht erklärt, dass die Übernahme-situationen dynamisch von den Versuchsleitern in Abhängigkeit von der gemessenen Müdigkeit ausgelöst wurden. Vielmehr bekamen die Probanden die Erklärung, dass die Anzahl und der Zeitpunkt solcher Übernahme-situationen „zufällig vom Computer ausgewählt und nicht durch die Versuchsleiter beeinflussbar“ sei. Hierdurch sollte vermieden werden, dass Probanden Müdigkeit vortäuschen, um ein schnelleres Ende des Versuchs herbeizuführen. Außerdem sollten die Probanden sich entsprechend der Situation in einem eigenen Fahrzeug weitgehend unbeobachtet fühlen.

3.2.4. Definition der gemessenen Parameter

Die erhobenen Daten in der vorliegenden Studie entsprachen den Parametern, die im ersten Teil der Studienreihe aufgezeichnet und ausgewertet wurden. Zusätzlich zu den Reaktionszeiten, Fahrdaten und Blickbewegungsdaten wurden in dieser Studie noch von geschulten Bewertern im Verlauf der Fahrt regelmäßig Müdigkeits-Indikatoren erhoben.

3.2.4.1. Fahrermüdigkeit

Um die Müdigkeit und die Ermüdung der Fahrer im Verlauf der Fahrtzeit aufzuzeichnen, wurden alle Versuchsleiter in einem Müdigkeitsbewertungsverfahren geschult. Die Grundlage für diese Schulung waren entsprechend der Vorlage von Wierwille und Ellsworth (1994), sowie der Weiterentwicklung von Wiegand et al. (2009) sowohl schriftliche Unterlagen mit Beschreibungen der objektiven Indikatoren von Müdigkeit als auch Videoausschnitte aus *naturalistic driving*-Studien, die zum Erlernen des Erkennens der Indikatoren verwendet wurden. Die Videoausschnitte zeigten Beispiele für alle möglichen Müdigkeitsindikatoren anhand von verschiedenen Personen.

Die Bewerber bekamen während der Schulung zunächst die Möglichkeit, sich ausführlich mit den Beschreibungen der Indikatoren und dem Fragebogen zur Auszählung der Indikatoren zu befassen sowie sich die Videoausschnitte anzusehen. Dann wurden den Bewertern zur Übung Videoausschnitte aus Realfahrten mit einer Dauer von einer Minute gezeigt, in denen sie die Indikatoren finden und aufzeichnen sollten. Dieser Prozess wurde wiederholt, bis die Bewerber sicher und reliabel in Ihren Bewertungen von Fahrermüdigkeit waren und sich die Bewertungen mit den vorab in den Videos bestimmten Indikatoren deckten.

Die Fahrermüdigkeit wurde während der Versuchsfahrten von den Bewertern über eine hochauflösende Infrarotkamera beobachtet, die auf das Gesicht und den Oberkörper der Probanden gerichtet war. Die Indikatoren für Müdigkeit (z.B. lange Lidschlüsse, Gähnen, Reiben des Gesichts) wurden jeweils in Abständen von 5 Minuten über eine Dauer von einer Minute mithilfe eines Beobachtungsbogens ausgezählt. Die Einstufung der Müdigkeit auf einer Skala von 0 (wach) bis 8 (sehr starke Müdigkeit) wurde anschließend anhand der gewichteten Anzahl der gezählten Indikatoren für diesen Zeitraum vorgenommen. Tabelle 3 listet die Müdigkeitsindikatoren auf, die für die unterschiedlichen Abstufungen der Müdigkeit in dieser Studie von den Bewertern erfasst wurden.

Tabelle 3: Müdigkeitsstufen und den geschulten Müdigkeits-Bewertern erfasste objektive Müdigkeitsindikatoren für jede Stufe.

Müdigkeits-Stufe	Müdigkeits-Indikatoren
0 - wach	Schnelle Lidschlüsse, unauffälliges Lidschlussverhalten, kontinuierliche Blickwechsel, Aufrechte Sitzposition, Schnelle Sakkaden, Lenkradhaltung „10 vor 2“
1 – leichte Müdigkeit (-)	Verlangsamter Lidschluss bis zu 0.5 Sekunde, müder Gesichtsausdruck, Gähnen, Reiben/Kratzen im Gesicht, Gesicht verziehen, Kopf schieflegen/abstützen
2 – leichte Müdigkeit (+)	
3 – mittlere Müdigkeit (-)	Lange Lidschlüsse (ca. 0.5-1 Sekunde), Augen starren/glasiger Blick ohne Blinzeln (Dauer > 3 Sekunden), Strecken/Räkeln, Augen halb geöffnet
4 – mittlere Müdigkeit (0)	
5 – mittlere Müdigkeit (+)	
6 – starke Müdigkeit (-)	Sehr lange Lidschlüsse (1-2 Sekunden), Wegrollen der Augen, Kopfnicken
7 – starke Müdigkeit (+)	
8 – sehr starke Müdigkeit	Lidschluss > 2 Sekunden, Sekundenschlaf, Aufschrecken

Anmerkung: Die Feinabstufungen der Müdigkeit (+/0/-) wurden jeweils für die Grobkategorien der Müdigkeit anhand der Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Indikatoren innerhalb des Bewertungszeitraum von einer Minute vorgenommen.

3.2.4.2. Reaktionszeiten

Als Maße für die Dauer der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung wurden die Reaktionszeiten der Fahrer erfasst. Einige dieser Reaktionszeiten beziehen sich hierbei auf Zeiten, die aus Videobeobachtungen abgeleitet wurden bzw. die sich aus den im Fahrsimulator aufgezeichneten Fahrdaten ergaben. Zusätzlich wurden aus den mit einem Blickerfassungssystem erhobenen Blickbewegungsdaten Reaktionszeiten abgeleitet. Die Endzeitpunkte für die Reaktionszeiten sowie die Kriterien für die Messung sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Allgemein wurde der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung als Startpunkt für die Reaktionszeitmessung gewählt.

Dieser Zeitpunkt ließ sich auch für die manuellen Fahrer verwenden, da manuelle Fahrer in dieser Versuchsbedingung zum gleichen Zeitpunkt wie die automatisiert fahrenden Fahrer eine Warnung ausgegeben bekamen und der Zeitpunkt der Warnung bzw. Übernahmeaufforderung somit für alle Versuchsteilnehmer standardisiert war. Die Start- und Endpunkte für die Reaktionszeitmessungen wurden im ersten Berichtsteil (Vogelpohl et al., 2016) auf Grundlage der verfügbaren Literatur definiert und sind dort ausführlicher berichtet. Für diese Studie wurden die Kriterien für die Reaktionszeitmessungen vollständig aus dem ersten Berichtsteil (Vogelpohl et al., 2016) übernommen.

Tabelle 4: Definierte Reaktionszeiten und Endzeitpunkte der Reaktionszeitmessungen.

Reaktionszeit	Endzeitpunkt der Reaktionszeitmessung
Eyes on Road	Blickfokus eindeutig auf der Straßenmitte (abgeleitet aus Blickbewegungsmessung)
Hands On	Mindestens eine Hand umfasst vollständig das Lenkrad (abgeleitet aus Videobeobachtung)
Feet On	Der rechte Fuß berührt das Gas-oder Bremspedal, bzw. der rechte Fuß verharrt reaktionsbereit unmittelbar über dem Bremspedal (abgeleitet aus Videobeobachtung)
Automation Off	Die Automation ist über die Verwendung des Bremspedals bzw. über das Ziehen des Lenkstockhebels hinter dem Lenkrad vom Fahrer deaktiviert worden
Brake Reaction	Das Bremspedal ist nach dem Zeitpunkt des Eintretens des kritischen Ereignisses um mindestens 10% durchgetreten
Gaze Side Mirror	Der erste Blick auf den linken Seitenspiegel nach der Übernahmeaufforderung
Gaze Speed	Der erste Blick auf den Tacho nach der Übernahmeaufforderung

3.2.4.3. Fahrdaten

Zusätzlich zu den Reaktionszeiten wurden in dieser Studie auch Fahrdaten aus der Fahrsimulation aufgezeichnet, um Maße für die Qualität der Fahrzeugführung nach der Übernahme der manuellen Steuerung zu sammeln. Die hier erhobenen und ausgewerteten Daten waren analog zu den Fahrdaten, die in Teil 1 dieser Studienreihe (Vogelpohl et al., 2016) aufgenommen wurden. Fahrdaten umfassten unter anderem den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nach der Übernahmeaufforderung, den minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug während der Übernahmesituation sowie die gewählte Geschwindigkeit während der Übernahmesituation. Zusätzlich wurden Parameter der Querführung und Spurhaltegüte ausgewertet, die die mittlere Abweichung von der Idealspur, die maximalen Querbeschleunigungen und den Zeitpunkt eines Spurwechsels beinhalteten. Auch mögliche Kollisionen mit umgebendem Verkehr und die Anzahl der Eingriffe der Automation bei Ausbleiben einer Übernahmereaktion der Fahrer wurden aufgezeichnet.

3.2.4.4. Subjektive Daten

Um den Empfehlungen aus der Literatur (Lal & Craig, 2001) Folge zu leisten, wurden die Testfahrer unmittelbar nach der Übernahme-situation auch nach ihrer subjektiven Müdigkeit gefragt. Die Probanden wurden gebeten, sowohl ihre Müdigkeit unmittelbar vor der Übernahmeaufforderung rückblickend einzuschätzen sowie ihre aktuelle Müdigkeit (unmittelbar nach dem Ende des Versuchs) zu beschreiben. Hierfür wurde die Karolinska Sleepiness Skala (Åkerstedt & Gillberg, 1990) mit den Polen „sehr wach“ bis „sehr müde, große Probleme wach zu bleiben“ verwendet.

Zusätzlich wurden von den Probanden Einschätzungen der Beanspruchung, Kontrollierbarkeit und Kritikalität der Übernahme-situationen erfragt. Jeweils nach Abschluss des Übernahme-szenarios wurden durch einzelne Fragebogen-Items die Kontrollierbarkeit und Beanspruchung der soeben erlebten Situation, das subjektive Risiko während der Situation sowie der Komfort und die zeitliche Beanspruchung bei der Übernahme der Steuerung des Fahrzeugs erhoben. Für die Gestaltung der Fragen wurde teilweise auf Neukum und Krüger (2003; Kontrollierbarkeit) und Items aus dem NASA Task-Load-Index (Hart und Staveland, 1988; Beanspruchung/zeitliche Beanspruchung) zurückgegriffen und teilweise eigene Items generiert (Komfort; Risiko). Der vollständige verwendete Fragebogen kann im Anhang „Fragebogen nach der Übernahme-situation“ eingesehen werden.

3.3. Beschreibung der Stichprobe

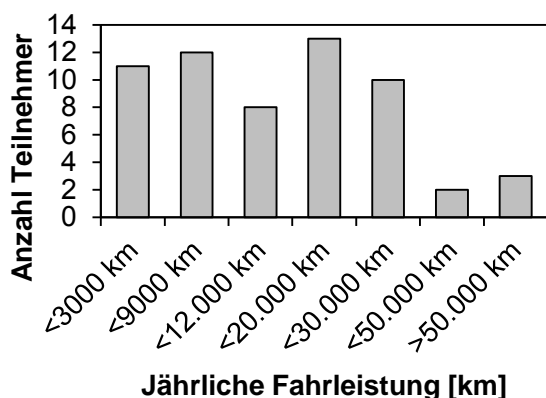


Abbildung 4: Angaben der Testfahrer über ihre jährliche Fahrleistung in Kilometern.

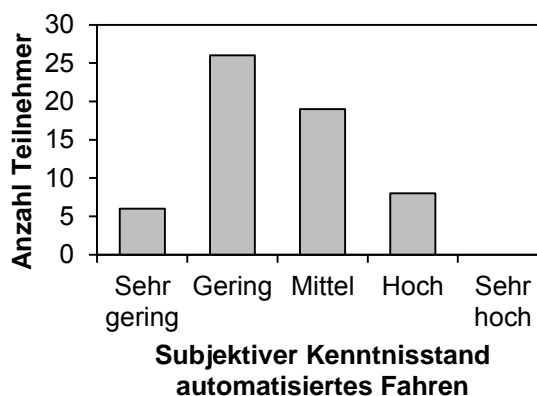


Abbildung 3: Angaben der Testfahrer über ihren subjektiven Kenntnisstand zum Thema automatisiertes Fahren.

An der Studie nahmen $N = 60$ Versuchspersonen im Alter von 18 bis 87 ($M = 41.3$, $SD = 21.1$) Jahren teil. Der Anteil der jüngeren Fahrer im Alter von 18 bis 35 Jahren lag bei 48%. Fahrer im mittleren Alter (36-55 Jahre) machten einen Anteil von 25% aus. Ältere Fahrer (55+) waren mit einem Anteil von 27% in der Stichprobe repräsentiert. In der Stichprobe waren 38 Personen (63%) männlich und 22 Personen (37%) weiblich. Ungefähr 75% der Teilnehmer hatten bereits Erfahrungen mit Assistenzsystemen der Längs- und/oder Querführung gesammelt. Etwas über die Hälfte der Teilnehmer hatte bereits mindestens einmal an einer Fahrsimulator-Studie teilgenommen. Keiner der Teilnehmer hatte im ersten Teil dieser Studienreihe an den Fahrversuchen teilgenommen, sodass das verwendete Übernahme-szenario für alle Teilnehmer unbekannt war. Die angegebene jährliche Fahrerfahrung der Teilnehmer ist in Abbildung 4 dargestellt. Zusätzlich ist in Abbildung 3 der

subjektiv eingeschätzte Kenntnisstand der Teilnehmer zum Thema automatisierte Fahrerassistenzsysteme zusammengefasst.

Im Zuge der Erhebung der demografischen Daten wurden die Teilnehmer der Studie auch gebeten, ihre Schlafdauer in der vorangegangenen Nacht sowie die Zeit seit dem letzten Schlaf anzugeben. Teilnehmer wurden hierbei noch einmal dazu ermutigt, die Schlafdauer realistisch anzugeben. Die mittlere Schlafdauer der Gruppe von Teilnehmern, die gebeten worden waren in der Nacht vor dem Versuch weniger zu schlafen, lag bei $M = 4$ Stunden und 52 Minuten. Für die Gruppe der Teilnehmer, die gebeten wurde in der Nacht vor der Versuch ausreichend zu schlafen, lag die mittlere Schlafdauer bei $M = 7$ Stunden und 52 Minuten. Dadurch dass die Versuche mit den müden Fahrern ausschließlich in dem Zeitraum zwischen 8 Uhr abends und 12 Uhr Nachts durchgeführt wurde, lag der letzte Schlaf bei dieser Gruppe im Mittel $M = 13$ Stunden und 55 Minuten zurück. Hingegen war seit dem letzten Schlaf bei der Gruppe der ausgeschlafenen Fahrer nur eine mittlere Zeit von $M = 6$ Stunden und 3 Minuten vergangen. Die Versuche mit dieser Probandengruppe wurde ausschließlich in den Zeiträumen zwischen 9 Uhr morgens und 11 Uhr morgens oder in dem Zeitraum zwischen 3 Uhr nachmittags und 5 Uhr nachmittags durchgeführt.

3.4. Ergebnisse und Diskussion

Die vorliegende Untersuchung sollte Informationen zu dem Verlauf der Müdigkeit während der automatisierten und nicht-automatisierten Fahrten mit und ohne Schlafmangel liefern. Außerdem sollte in Abhängigkeit von dieser Müdigkeit bzw. in Abhängigkeit von der Dauer der Fahrt die Fähigkeit zur Übernahme der manuellen Steuerung untersucht werden. Die Ergebnisse gliedern sich also entsprechend in die Ergebnisse zu den Müdigkeitsmessungen vor einer Übernahmeaufforderung und die Ergebnisse zur Dauer und Qualität der Übernahme der Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung. Abschließend werden außerdem die subjektiven Einschätzungen der Übernahmesituation berichtet.

3.4.1. Müdigkeit im Verlauf der Fahrt

Die Müdigkeit im Verlauf der Fahrt wurde anhand der oben beschriebenen Indikatoren (z.B. verlängerte Lidschlüsse, Gähnen, Sekundenschlaf) von geschulten Bewertern aufgezeichnet. Die Auszählung der Indikatoren führte anschließend zur Einstufung der Testfahrer auf einer Müdigkeitsskala von 0 (wach) bis 8 (sehr starke Müdigkeit). Die Indikatoren für Müdigkeit wurden von Beginn der Fahrt an in Abständen von 5 Minuten für jeweils eine Minute aufgezeichnet.

Erreichten Fahrer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit die Müdigkeitsstufe 3 (mittlere Müdigkeit, verlängerte Lidschlüsse, Strecken, Augen starren ohne Blinzeln für 3-4 Sekunden) wurde eine Übernahmeaufforderung ausgelöst. Im Gegensatz zu der Versuchsbedingung, in denen Fahrer ausreichend Schlaf in der vorausgegangenen Nacht gehabt hatten, endete dann der Versuch teilweise nach kürzerer Fahrt. Fahrer, die die Fahrt beendet hatten, weil die Versuchsleiter die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten, wurden in den Daten als ausgeschieden („Dropped out“) klassifiziert. Die Übernahmeaufforderung wurde in allen Versuchsbedingungen frühestens nach einer Fahrtdauer von 15 Minuten und spätestens nach einer Fahrtdauer von 60 Minuten (lange Fahrtdauer) ausgelöst.

Abbildung 5 stellt zunächst den Verlauf der Müdigkeit für die manuellen Fahrer über die Dauer der Versuchsfahrten dar. Hier sind sowohl Fahrer aus der Gruppe der manuellen Fahrer mit Schlafdefizit als auch aus der Gruppe der manuellen Fahrer ohne Schlafdefizit

enthalten. Zum Vergleich ist der Verlauf der Müdigkeit für die automatisiert fahrenden Fahrer über die Fahrdauer in Abbildung 6 dargestellt. Auch hier sind sowohl Fahrer aus der Gruppe mit Schlafdefizit und ohne Schlafdefizit enthalten.

In den Abbildungen 5 und 6 werden bereits grafisch die unterschiedlichen Verläufe der Müdigkeit bei manuellen Fahrern im Vergleich zu automatisiert fahrenden Fahrern deutlich. Bei automatisiert fahrenden Fahrern werden allgemein höhere Müdigkeitslevel erreicht und diese Müdigkeitslevels werden außerdem schneller erreicht als bei manuellen Fahrern. Ein besonders deutlicher Anstieg der Indikatoren für Müdigkeit wurde nach einer automatisierten Fahrtzeit von 15-35 Minuten beobachtet (vgl. Abbildung 5). Eine ähnlich hohe Anzahl an Versuchspersonen, die mindestens den Müdigkeitslevel „mittlere Müdigkeit“ erreichten, konnte bei den manuellen Fahrern erst nach einer deutlich längeren Fahrtzeit (ca. 45-50 Minuten Fahrtzeit, vgl. Abbildung 6) beobachtet werden.

Dieser grafische Eindruck findet sich in der statistischen Analyse bestätigt. Es fand sich ein Interaktionseffekt zwischen der Faktoren Müdigkeit (Schlafdefizit/kein Schlafdefizit) und Anwesenheit von Automation (manuelles Fahren/automatisiertes Fahren) $F(1,56) = 10.02$, $p < .01$, $\eta^2 = .15$, sowie ein Haupteffekt für diese Faktoren (Automation: $F(1,56) = 6.25$, $p = .02$, $\eta^2 = .10$; Müdigkeit: $F(1,56) = 16.02$, $p < .01$, $\eta^2 = .22$). Hier wurde zunächst die Auftretenshäufigkeit von Müdigkeitsstufen innerhalb der vier Versuchsgruppen unabhängig von dem Verlauf der Müdigkeit über die Fahrdauer analysiert. Wird der Zeitpunkt des Müdigkeitsratings als zusätzlicher Faktor in das statistische Modell aufgenommen, zeigt sich auch der Einfluss des zeitlichen Verlaufs der Müdigkeit in den Ergebnissen: Die signifikante Interaktionen zwischen dem Zeitpunkt der Messung und der Höhe der gemessenen Müdigkeit ($F(11,616) = 14.74$, $p < .01$, $\eta^2 = .21$) deutet zunächst auf eine generelle Zunahme der Müdigkeit mit der Fahrdauer hin, die auch grafisch in Abbildung 5 und 6 deutlich wird. Allerdings findet sich in den Ergebnisse auch eine dreifache Interaktion zwischen dem Zeitpunkt der Messung, der Anwesenheit von Automation und der Anwesenheit eines Schlafdefizits ($F(11,616) = 4.88$, $p < .01$, $\eta^2 = .08$), jedoch mit einer sehr kleinen Effektstärke.

Diese komplexe Interaktion erschwert die Interpretation der Daten. Allerdings kann auf Grundlage der grafischen Aufbereitung der Müdigkeitsverläufe der einzelnen Versuchsgruppen (siehe Abbildungen 7-10) davon ausgegangen werden, dass sich die von den Bewertern beurteilte Müdigkeit allgemein im Verlauf der Fahrt zunahm. Diese Zunahme war stärker ausgeprägt für die automatisiert fahrenden Fahrer als für die manuellen Fahrer. Zusätzlich wurde der Effekt durch die vorherige Anwesenheit eines Schlafdefizits verstärkt. Fahrer mit automatisierten Fahrerassistenzsystemen scheinen also besonders anfällig für Fahrermüdigkeit zu sein. Die Anfälligkeit für Müdigkeit wurde stark begünstigt durch ein vorheriges Schlafdefizit. Zwar zeigten auch manuelle Fahrer mit Schlafdefizit im Verlauf der Fahrt deutliche Anzeichen von Fahrermüdigkeit. Bezogen auf die vorliegende Stichprobe trat diese Müdigkeit aber langsamer ein als bei automatisiert fahrenden Fahrern.

Besonders kritisch ist, dass selbst bei automatisiert fahrenden Fahrern ohne Schlafdefizit bereits nach relativ kurzen Fahrdauern hohe Level von Müdigkeit gefunden wurden, die so bei den manuellen Fahrern ohne Schlafdefizit nur sehr selten vorkamen.

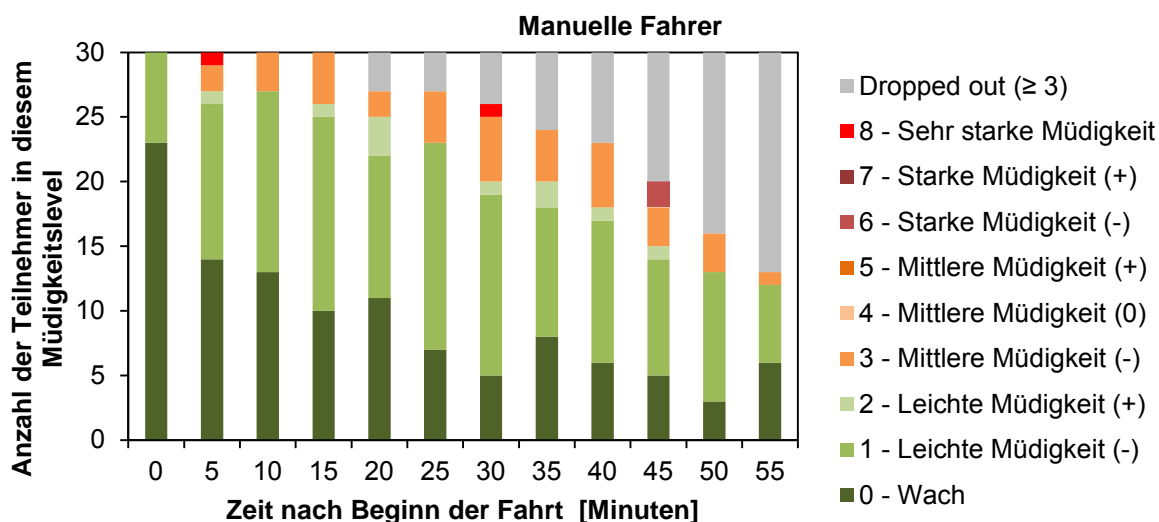


Abbildung 6: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

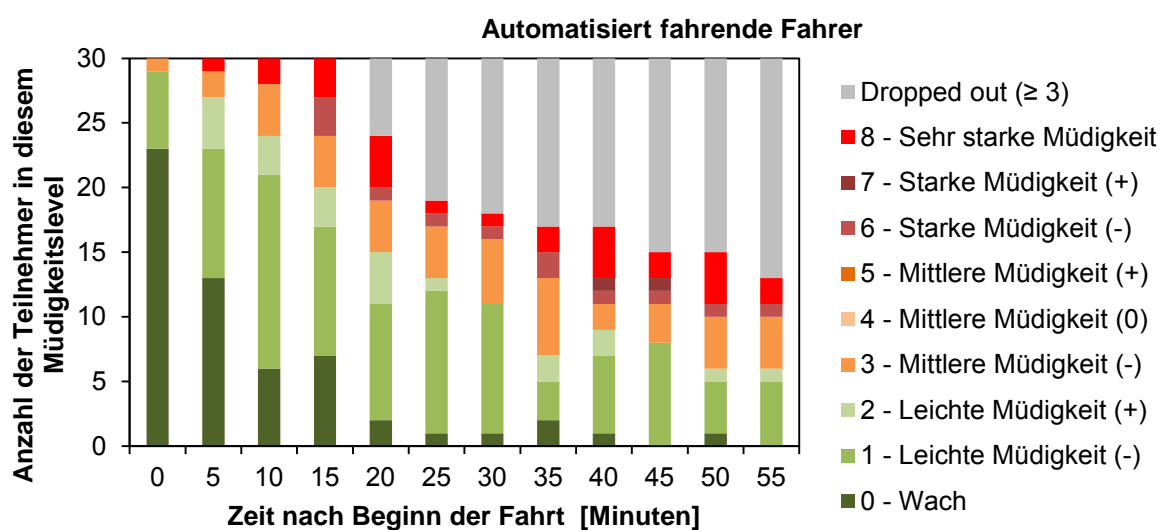


Abbildung 5: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

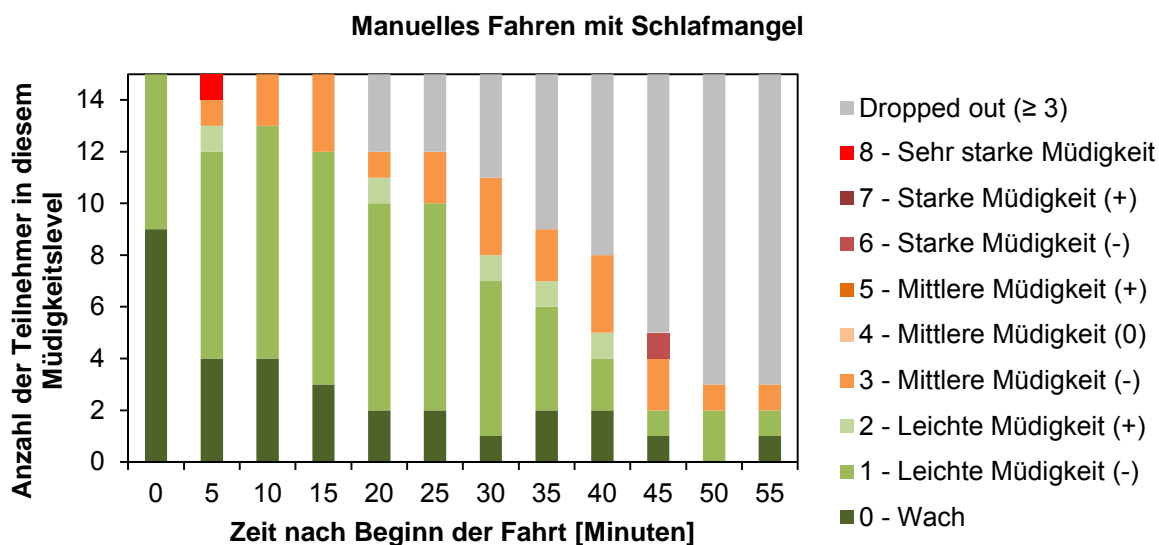


Abbildung 7: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren mit Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

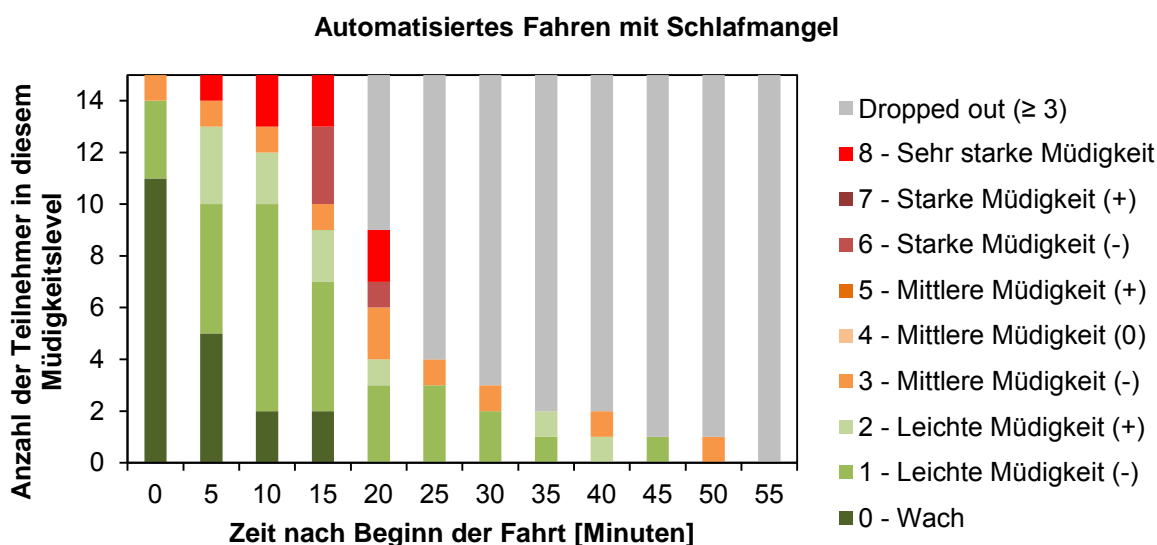


Abbildung 8: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren mit Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

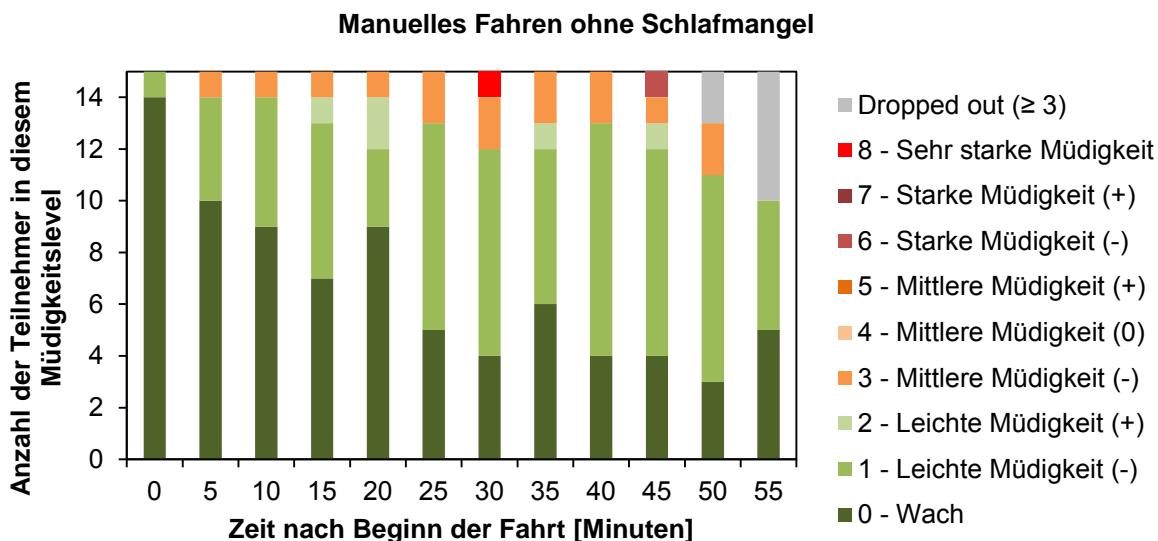


Abbildung 9: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung manuelles Fahren ohne Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

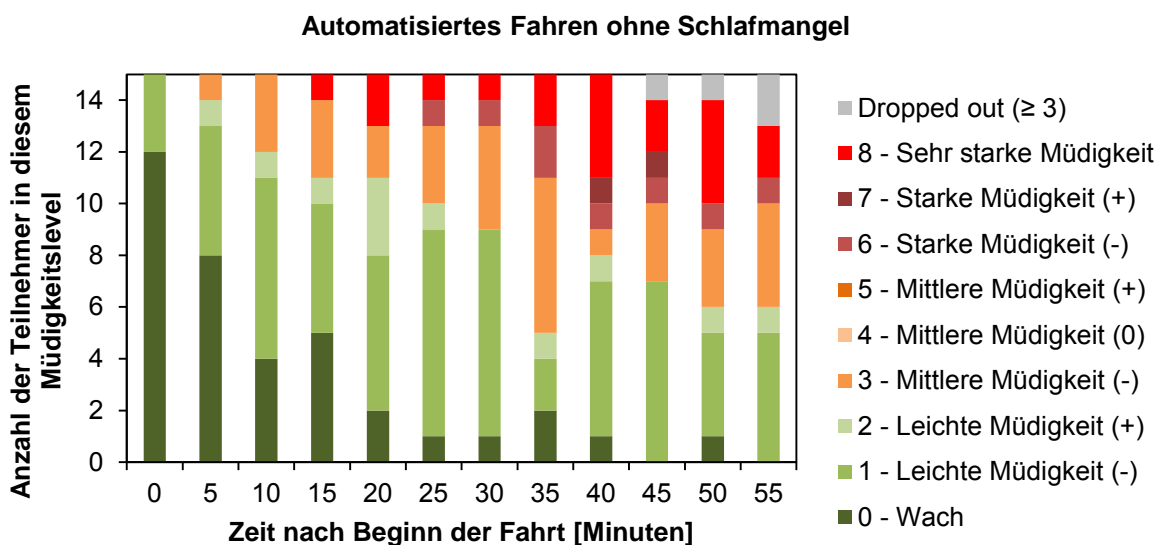


Abbildung 10: Verlauf der Müdigkeitsbewertungen der Testfahrer in der Versuchsbedingung automatisiertes Fahren ohne Schlafmangel durch die geschulten Bewerter über die Fahrdauer. Die Kategorie „Dropped out“ bezeichnet Teilnehmer in der Versuchsbedingung mit Schlafdefizit, die mindestens das Müdigkeitslevel „3 – Mittlere Müdigkeit“ erreicht hatten und bei denen die Versuchsleiter daher die Übernahmeaufforderung ausgelöst hatten.

Anhand der Verläufe der Müdigkeitsbewertungen über die Fahrtzeit lassen sich auch erste Hinweise auf die Dauer der Entwicklung von Fahrermüdigkeit ableiten. Während bei manuellen Fahrern mit ausreichend Schlaf während einer Fahrtzeit von ca. einer Stunde trotz relativ eintöniger Fahrumgebung im Simulator nur sehr selten höhere Level von Müdigkeit auftraten (siehe Abbildung 9), zeigten sich Anzeichen für mittlere bis starke Müdigkeit bei der Hälfte der automatisiert fahrenden Fahrern mit ausreichend Schlaf bereits nach ca. 30-35 Minuten (siehe Abbildung 10).

Noch deutlich schneller zeigten sich die Anzeichen für mittlere bis starke Müdigkeit in der Gruppe der Fahrer mit Schlafmangel. Allgemein wurden in der Hälfte dieser Fahrergruppe nach ca. 20-25 Minuten Anzeichen für mindestens mittlere Müdigkeit gefunden. Wiederum jeweils die Hälfte der manuellen Fahrer mit Schlafmangel zeigten Anzeichen für mindestens mittlere Müdigkeit nach ca. 35 Minuten (siehe Abbildung 7). Bei der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer mit Schlafmangel zeigten sich Anzeichen für mindestens mittlere Müdigkeit bei der Hälfte der Teilnehmer hingegen bereits nach ca. 20 Minuten (siehe Abbildung 8).

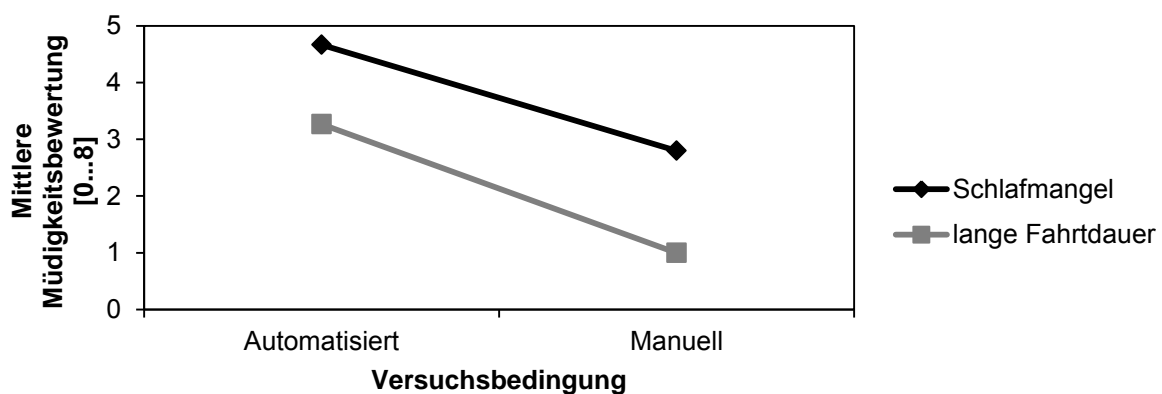


Abbildung 11: Letzte Müdigkeitsbewertung durch geschulte Bewerter vor der Übernahmeaufforderung in den verschiedenen Versuchsbedingungen.

Um ein Maß für die Müdigkeit der Fahrer unmittelbar vor der Übernahme-situation zu erhalten wurde die letzte Müdigkeitsbewertung vor der Übernahme-situation noch einmal separat ausgewertet. Abbildung 11 zeigt Mittelwerte für die Müdigkeitsbewertungen der Fahrergruppen mit Schlafmangel und mit Automation, mit Schlafmangel und mit manueller Fahrweise ohne Schlafmangel und mit Automation sowie ohne Schlafmangel und mit manueller Fahrweise. Es zeigten sich für diese letzte Bewertung vor der Übernahmeaufforderung signifikante Haupteffekte für die Faktoren Anwesenheit von Automation ($F(1,56) = 15.03, p < .01, \eta^2 = .21$) und Schlafmangel ($F(1,56) = 9.01, p < .01, \eta^2 = .14$). Für diese Messung wurde kein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren gefunden.

Die gefundenen Werte deuten darauf hin, dass Fahrer unter Anwesenheit von Automation und vor der Übernahme der manuellen Steuerung stärker ermüdet waren als manuelle Fahrer. Außerdem waren Fahrer mit Schlafmangel stärker kurz vor der kritischen Übernahme-situation stärker ermüdet als Fahrer ohne Schlafmangel. Eine post-hoc Analyse der einzelnen Gruppenunterschiede fand signifikante Unterschiede zwischen den automatisiert fahrenden Fahrern mit Schlafmangel und den manuellen Fahrern ohne Schlafmangel ($p < .01$), ebenso fanden sich Unterschiede zwischen der Gruppe der

manuellen Fahrer ohne Schlafmangel und den automatisiert fahrenden Fahrern ohne Schlafmangel ($p = .02$).

Die Einstufungen der geschulten Müdigkeits-Bewerter wurden mit den Selbsteinschätzungen der Fahrer verglichen. Die Fahrer sollten unmittelbar im Anschluss an den Versuch ihre Müdigkeit vor der Übernahme-situation sowie ihre aktuelle Müdigkeit auf der Karolinska Sleepiness Skala einschätzen. Hier zeigte sich ein ähnlicher Trend wie bei den letzten Müdigkeitseinschätzungen der Müdigkeits-Bewerter. Fahrer in der Gruppe mit Automation

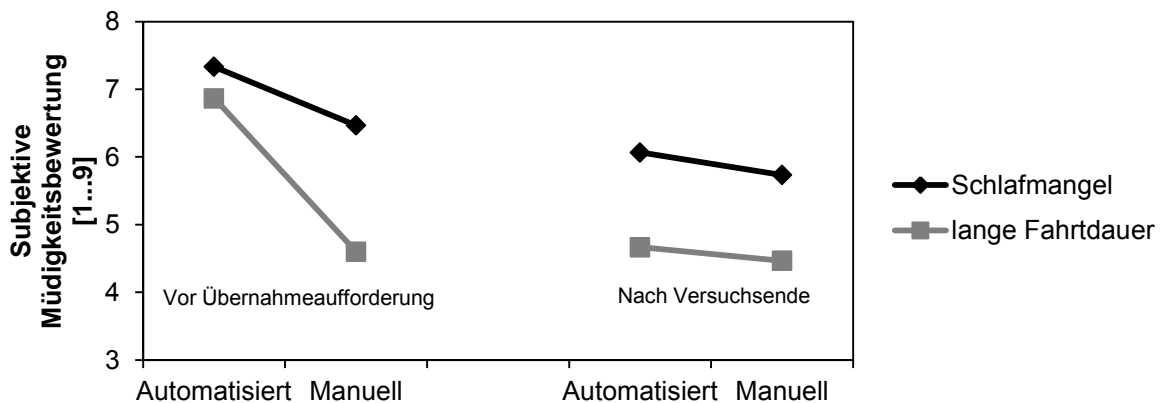


Abbildung 12: Mittlere subjektive Müdigkeitsbewertung der Fahrer auf der Karolinska Sleepiness Skala vor der Übernahmeaufforderung (links) und nach dem Versuch (rechts).

und Schlafmangel schätzten sich vor der Übernahme-situation im Mittel als am stärksten Müde ein ($M = 7.3$, $SD = 1.1$; entspricht in etwa der Skalenbeschriftung „Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben“), gefolgt von den Fahrern in der Gruppe mit Automation und langer Fahrtdauer ($M = 6.9$, $SD = 2.3$) und den Fahrern in der manuelle Fahrenden Gruppe mit Schlafmangel ($M = 6.5$, $SD = 1.7$). Diese beiden mittleren Bewertungen entsprechen in etwa den Skalenbeschriftungen „Weder wach noch Müde“ bis „Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben“. Als weniger ermüdet beschrieben sich die Fahrer in der Gruppe der manuellen Fahrer mit langer Fahrtdauer. Hier lag die mittlere subjektive Müdigkeit bei $M = 4.6$ ($SD = 2.4$). Diese subjektiven Einschätzungen unmittelbar vor der Übernahmeaufforderung waren hoch korreliert mit den letzten Müdigkeitsbewertungen vor der Übernahmeaufforderung (Korrelation von $.53$, $p < .01$).

Erwähnenswert ist hierbei noch, dass Fahrer bei der Frage nach Ihrer subjektiven Müdigkeit nach Beendigung des Versuchs im Mittel ankreuzten sie seien weniger müde ($M = 6.3$, $SD = 2.2$; ungefähr „Weder wach noch müde“ – „Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben“) im Vergleich zu dem Zeitpunkt unmittelbar vor der Übernahmeaufforderung ($M = 5.2$, $SD = 1.9$; ungefähr „Wach“ – „Weder wach noch müde“) mit $F(1,56) = 24.34$, $p < .01$, $\eta^2 = .30$. Hier fanden wir außerdem eine Interaktion des Zeitpunkts der Müdigkeit (unmittelbar vor Übernahmeaufforderung/nach Versuch) mit der Anwesenheit von Automation (automatisiertes Fahren/manuelles Fahren) mit $F(1,56) = 8.76$, $p < .01$, $\eta^2 = .14$. Die subjektiven Angaben der Fahrer zu Ihrer Müdigkeit vor der Übernahme-situation und nach Ende des Versuchs sind in Abbildungen 12 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die subjektive Müdigkeit bei den Fahrern mit ausreichend Schlaf nach Beendigung der Fahrt mit Automation wieder auf ein normales Niveau zurückkehrte, das mit dem der manuellen Fahrergruppe ohne Schlafmangel vergleichbar war. Bei den Gruppen mit Schlafmangel blieb die Müdigkeit hingegen subjektiv

auch nach Beendigung des Versuchs bestehen – sowohl bei den Gruppen mit Automation als auch bei den manuellen Fahrern. Bei der Müdigkeit, die durch das Bewertungsverfahren während der Fahrt gemessen wurde, könnte es sich also um zwei verschiedene Arten von Müdigkeit handeln: Auf den langen Fahrten trat in der Gruppe mit Automation wahrscheinlich primär aufgabenbezogene Müdigkeit auf, die sich durch die Unterbrechung der Aufgabe vermindern ließ. Auf den Fahrten mit Schlafmangel wirkte auf die Fahrer vermutlich primär die schlafbezogene Müdigkeit, die sich auch nach Unterbrechung der Aufgabe nur wenig verminderte. Auch eine hohe Korrelation der subjektiv berichteten Müdigkeit nach Beendigung des Versuchs mit der angegebenen Schlafdauer in der vorangegangenen Nacht ($r = .40$, $p < .01$) deutet auf eine primäre Wirkung der schlafbezogenen Müdigkeit in den Versuchsgruppen mit Schlafmangel hin.

Diese Hypothese ist gut vereinbar mit den Befunden von Karrer et al. (2005) sowie Briest, Karrer & Schleicher (2005), die viele der von den Bewertern in dieser Studie verwendeten Indikatoren für Fahrermüdigkeit bei Fahrern nach langen, monotonen Autofahrten fanden. Die Autoren argumentieren, dass sich dieser Zustand als *Driving Without Awareness* beschreiben lässt, in dem Fahrer ein vermindertes Situationsbewusstsein haben und sich an Teile der Fahrtstrecke nicht mehr erinnern können. Dieses *Driving Without Awareness* könnte demnach gut die Situation der automatisiert fahrenden Fahrer nach einer längeren Fahrtdauer beschreiben.

Zusammenfassend ist die wichtigste Erkenntnis aus der Messung der Müdigkeit der Fahrer im Verlauf der Fahrt, dass Fahrer mit Automation Schwierigkeiten haben, über längere Zeiträume hinweg Aufmerksamkeit für die Fahrumgebung aufrecht zu erhalten. Im Vergleich zu manuellen Fahrern zeigen solche Fahrer deutlich schneller Anzeichen von Fahrermüdigkeit und ziehen sich teilweise stark aus der Verkehrssituation zurück. Besonders stark ausgeprägt ist dieser Effekt bei Fahrern, bei denen durch Schlafmangel aus der vorangegangenen Nacht bereits schlafbezogene Müdigkeit vorliegt. Allerdings fanden sich auch in der Versuchsgruppe der automatisiert fahrenden Fahrer ohne Schlafmangel teilweise sehr deutliche Indikatoren für ein Nachlassen der Aufmerksamkeit und die Entwicklung von aufgabenbezogener Müdigkeit. Die Literatur (siehe Abschnitt 2.2.2.) deutet darauf hin, dass ein solcher Fahrerszustand die Qualität der Fahrzeugführung negativ beeinflussen kann. Außerdem erhöht sich bei Fahrern, die durch aufgabenbezogene Müdigkeit beeinträchtigt sind, die Wahrscheinlichkeit, mögliche Fehlermeldungen des Systems zu verpassen (vergleiche Abschnitt 2.1.3.) oder verlangsamt auf Abweichungen vom normalen Systemverhalten zu reagieren.

Im nächsten Schritt wurden dementsprechend die Reaktionszeiten und die Qualität der Fahrzeugführung der Fahrer nach einer Übernahmeaufforderung bzw. nach einer Warnung durch das System analysiert. Hierdurch können Hinweise darauf gesammelt werden, ob die durch die Fahrerbeobachtung deutlich nachgewiesene Fahrerszustandsveränderung bei langen automatisierten Autofahrten und mit ermüdeten Fahrern einen Einfluss auf das Fahrerverhalten in solchen Situationen hat.

3.4.2. Reaktionszeiten und Qualität der Fahrzeugführung nach einer Übernahmeaufforderung

Reaktionszeiten auf die Übernahmeaufforderung bei den automatisiert fahrenden Fahrern bzw. auf die Warnung bei manuellen Fahrern können Hinweise auf die Dauer der Übernahme der manuellen Kontrolle sowie auf den Aufbau des Situationsbewusstseins geben. Besonders aufschlussreich sind hierbei die Blickbewegungen, die mit dem Aufbau

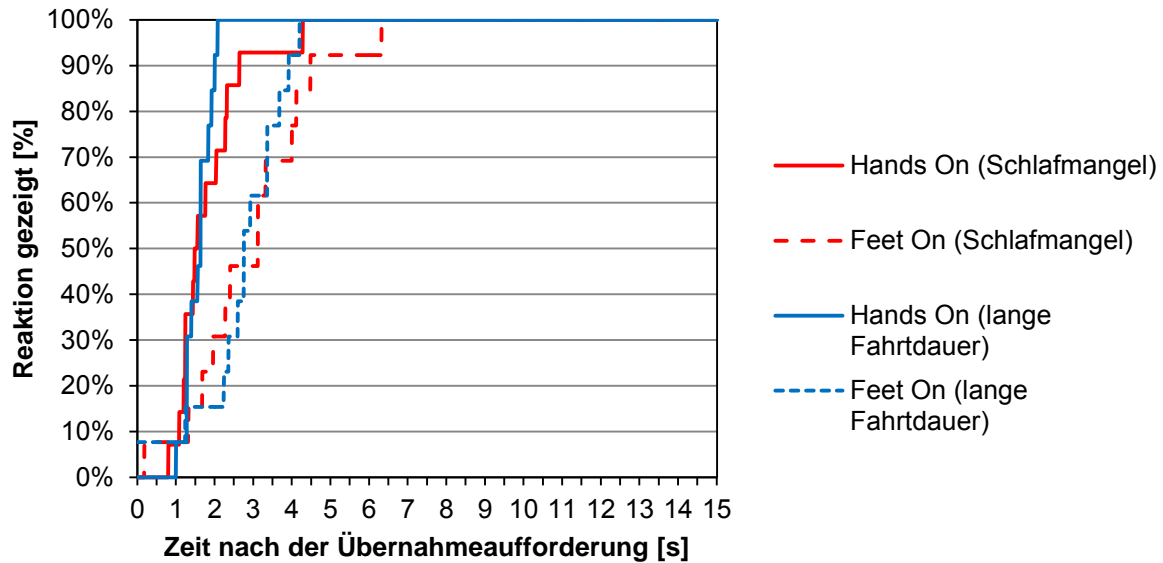


Abbildung 13: Darstellung der Dauer der Bewegungen zu den Stellteilen Lenkrad und Pedale nach einer Übernahmeaufforderung.

eines Bewusstseins für die Verkehrssituation einhergehen, aber auch die motorischen Reaktionen, die das physische Wiederherstellen des Kontakts mit den Stellteilen des Fahrzeugs begleiten. Ergänzend wurde das Fahrverhalten der Fahrer hinsichtlich Bremsverhalten, Geschwindigkeitswahl, Wahl der Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen und Spurhaltegröße untersucht.

Abbildung 13 stellt zunächst die motorischen Reaktionen der automatisiert fahrenden Fahrer auf die Übernahmeaufforderung dar. Hierfür wurde analog zum ersten Teil dieser Studienreihe (Vogelpohl et al., 2016) eine Darstellungsweise gewählt, die Rückschlüsse auf die Verteilung der Reaktionszeiten über die Zeit zulässt. Auf der X-Achse wurde hierfür die vergangene Zeit seit der Übernahmeaufforderung abgetragen. Auf der Y-Achse ist der Anteil an Fahrern dargestellt, der zu dem jeweiligen Zeitpunkt nach der Übernahmeaufforderung die aufgezeichneten Reaktionen (z.B. Hände am Lenkrad, Blick in den Seitenspiegel) gezeigt hatte. Alle folgenden Darstellungen sind auf diese Weise gestaltet, die z.B. wie folgt zu interpretieren sind: „90% der Fahrer in der Gruppe der Fahrer mit Schlafmangel hatten ca. 2.5 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung Ihre Hände wieder am Lenkrad“. Auf diese Weise erhält man einen sehr viel besseren Eindruck über die Verteilung der Messwerte in der Stichprobe als bei einer Darstellung von Mittelwerten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Reaktionszeiten wurde immer ein Zeitraum von 15 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung bzw. 15 Sekunden nach der Warnung dargestellt.

Für die motorischen Reaktionen „Hände am Lenkrad“ und „Füße an den Pedalen“ ergaben sich keine eindeutigen Unterschiede zwischen der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer mit Schlafmangel und den Fahrern nach einer langen Fahrtdauer. Der Unterschied zu den manuellen Fahrern konnte nicht sinnvoll ausgewertet werden, da alle Fahrer aus dieser Gruppe zum Zeitpunkt des Warnsignals ihre Hände am Steuer und die Füße an den Pedalen hatten. Generell hatten Fahrer nach einer Phase der automatisierten Fahrt im Mittel $M = 1.7$ ($SD = 0.7$) Sekunden nach der Übernahmeaufforderung das Lenkrad wieder in der Hand und nach $M = 2.8$ ($SD = 1.4$) Sekunden den Fuß wieder an den Pedalen. Einzelne Probanden benötigten für diese Reaktionen jedoch bis zu 4.3 Sekunden (Hände am Lenkrad) bzw. 6.3

Sekunden (Fuß an den Pedalen) nach einer Übernahmeaufforderung (vergleiche Abbildung 12).

Hinsichtlich des ersten Blicks auf die Straße nach der Übernahmeaufforderung bzw. nach der Warnung fand sich ein wenig überraschender Unterschied zwischen der Gruppe der manuellen Fahrer und der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer. Fahrer in der manuell fahrenden Versuchsgruppe hatten im Mittel bereits $M = 0.0$ ($SD = 0.1$) Sekunden nach dem Warnsignal die Augen wieder auf der Mitte der Spur, was hauptsächlich dadurch zu begründen ist, dass die Fahrer ohnehin die meiste Zeit auf die Straße schauten, um das Fahrzeug zu steuern. Automatisiert fahrende Fahrer benötigten hingegen im Schnitt $M = 0.2$ ($SD = 0.4$) Sekunden um den Blick wieder auf die Spurmitte zu richten ($F(1,51) = 6.20$, $p = .02$, $\eta^2 = .11$). Die automatisiert fahrenden Fahrer mit Schlafmangel und nach einer langen Fahrtdauer unterschieden sich hinsichtlich des ersten Blicks auf die Spurmitte nicht. Sowohl für die Fahrer mit Automation als auch für die manuellen Fahrer fand sich kein Haupteffekt für die Ursache der Fahrermüdigkeit (Schlafmangel/lange Fahrtdauer) und auch keine Interaktion zwischen den Faktoren.

Die Deaktivierung der Automation nach einer Übernahmeaufforderung erfolgte über den Lenkstockhebel oder über die Betätigung des Bremspedals. Die Fahrer deaktivierten die

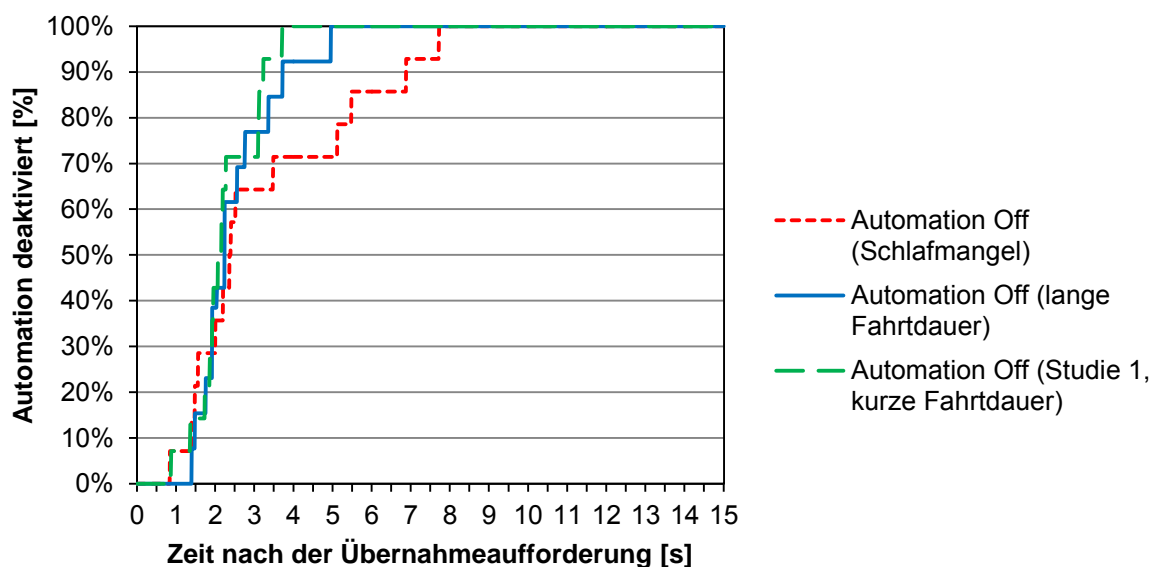


Abbildung 14: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zur Deaktivierung der Automation nach einer Übernahmeaufforderung.

Automation im Durchschnitt $M = 2.9$ ($SD = 1.7$) Sekunden nach der Übernahmeaufforderung. Fahrer mit Schlafmangel deaktivierten das System im Mittel etwas später ($M = 3.6$, $SD = 2.2$ Sekunden) als Fahrer nach einer langen Phase der automatisierten Fahrt ($M = 2.5$, $SD = 1.0$ Sekunden). Dieser Unterschied wurde jedoch in den statistischen Tests nicht signifikant ($p = .24$), was durch die relativ großen Streuungen zu erklären ist. Die längsten Zeiten bis zum Abschalten der Automation fanden sich in der Gruppe der Fahrer mit Schlafmangel: 7.7 Sekunden, 6.9 Sekunden und 5.5 Sekunden. Die Reaktionszeiten bis zum Abschalten der Automation sind in Abbildung 14 noch einmal als Übersicht für die Gruppe der Fahrer mit Schlafmangel, für die Gruppe der Fahrer nach einer langen Phase der automatisierten Fahrt und zum Vergleich für die Gruppe der Fahrer nach einer kurzen automatisierten Fahrt (ca. 5 Minuten) ohne Nebenaufgabe aus Teil 1 der Studienreihe dargestellt. Fahrer im ersten Teil

der Studienreihe schalteten in der gleichen Übernahmesituation und unter vergleichbaren Versuchsbedingungen die Automation im Mittel nach $M = 2.6$ ($SD = 0.8$) Sekunden aus. Wie aus der Grafik zu erkennen ist, waren die Reaktionszeiten in der Stichprobe der Fahrer nach einer langen automatisierten Fahrt und nach einer kurzen automatisierten Fahrt (Studie 1) annähernd gleich verteilt. Hingegen gab es in der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer mit Schlafmangel einige Personen (ca. 30% dieser Versuchsgruppe, $n = 4$), die deutlich verzögert auf die Übernahmeaufforderung reagierten und ungefähr 5 bis 8 Sekunden benötigten, um die Automation zu deaktivieren. Von diesen vier Personen wurden drei Personen von den Müdigkeits-Bewertern als mindestens „stark ermüdet“ eingestuft. Eine nachträgliche Analyse der Beobachtungsvideos dieser vier Personen ergab, dass in der Minute vor der Übernahmeaufforderung alle Personen sehr lange Lidschlüsse und starke Anzeichen für Müdigkeit gezeigt hatten. In zwei Fällen konnte in diesem Zeitraum sogar ein Wegrollen der Augen sowie Sekundenschlaf beobachtet werden. Zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung hatten alle diese Personen die Augen jedoch geöffnet, wären also rein auf Grundlage einer kurzfristigen Beobachtung möglicherweise als für eine Übernahme verfügbar eingestuft worden.

Als ein Maß für den Aufbau des Situationsbewusstseins nach der Übernahmeaufforderung sollte der erste Blick auf den Seitenspiegel dienen. Im ersten Teil dieser Studie (Vogelpohl et al., 2016) hatte sich gezeigt, dass Fahrer, die vor der Übernahmeaufforderung durch eine motivierende Nebenaufgabe abgelenkt waren, ca. 5 Sekunden länger benötigten als manuelle Fahrer, um auf diese Weise ein Verständnis für die umgebenden Verkehrsteilnehmer aufzubauen. In der vorliegenden Studie fanden sich jedoch weder zwischen den automatisiert fahrenden Fahrern und den manuellen Fahrern noch zwischen den durch lange Fahrtdauer oder Schlafmangel ermüdeten Fahrern statistisch nachweisbare Unterschiede. Dies kann wiederum durch relativ große Streuungen bedingt sein, die auf große Unterschiede in den individuellen Reaktionen hinweisen. Deskriptiv war die Zeit bis zum ersten Blick in den Spiegel länger in der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer ($M = 12.2$, $SD = 6.2$ Sekunden) im Vergleich zu der Gruppe der manuellen Fahrer ($M = 10.4$, $SD = 6.1$ Sekunden). Automatisiert fahrende Fahrer mit Schlafmangel schauten im Mittel am spätesten in den Seitenspiegel ($M = 13.8$, $SD = 5.0$ Sekunden). Die anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten aller vier Versuchsgruppen bis zum ersten Blick in den Seitenspiegel nach der Übernahmeaufforderung sind in Abbildung 16 noch einmal grafisch dargestellt.

Ein möglicher Grund für den weniger deutlich ausgeprägten Unterschied zwischen den manuellen Fahrern und den automatisiert fahrenden Fahrern könnte sowohl in der fehlenden Nebenaufgabe in der vorliegenden Studie liegen als auch durch die Auswahl der Übernahmesituation bedingt sein, in der ein Blick in den Spiegel zur Bewältigung der Situation nicht zwingend erforderlich war. Das Einschätzen der Geschwindigkeit des Fahrzeugs war in dem in dieser Studie verwendeten Übernahmeszenario hingegen essenziell, da der einsetzende Starkregen eine Reduktion der Geschwindigkeit sinnvoll erscheinen lässt. Zusätzlich musste die Geschwindigkeit an das stark verlangsamende vorausfahrende Fahrzeug angepasst werden. Dass die aktuelle Geschwindigkeit in dieser Situation eine hochrelevante Information für die Fahrer darstellte, lässt sich an den schnellen Reaktionszeiten der manuellen Fahrer nach der Übernahmeaufforderung/Warnung ablesen: Manuelle Fahrer schauten im Mittel bereits nach $M = 3.4$ ($SD = 1.9$) Sekunden auf den Tacho, im Vergleich zu den automatisiert fahrenden Fahrern, die diese Reaktion im Mittel erst nach $M = 6.3$ ($SD = 4.7$) Sekunden zeigten ($F(1, 50) = 9.01$, $p < .01$, $\eta^2 = .15$). Die anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten aller vier Versuchsgruppen bis zum ersten Blick auf

den Tacho nach der Übernahmeaufforderung sind in Abbildung 15 noch einmal grafisch dargestellt.

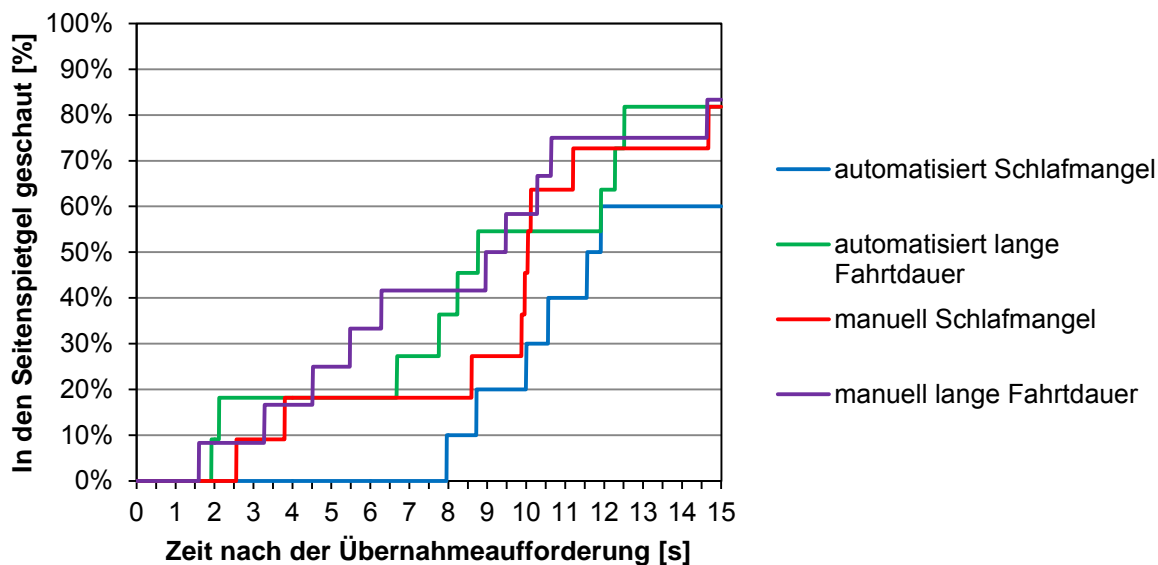


Abbildung 16: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick in den Seitenspiegel nach einer Übernahmeaufforderung.

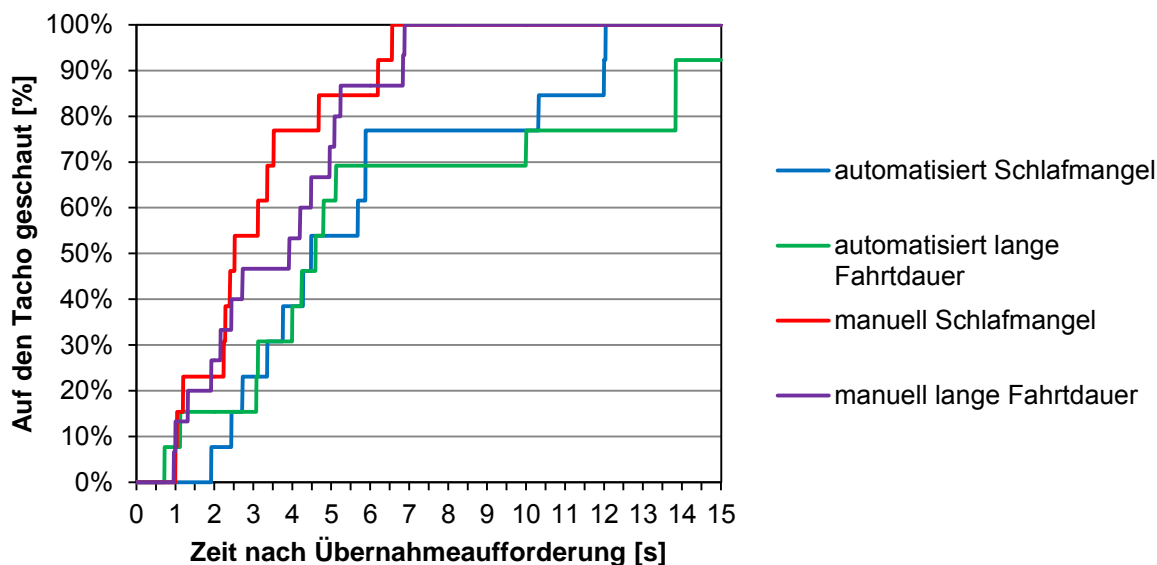


Abbildung 15: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho nach einer Übernahmeaufforderung.

Ein Effekt der Ursache der Fahrermüdigkeit (Schlafmangel/lange Fahrdauer) auf die Zeit bis zum ersten Blick auf den Tacho wurde nicht festgestellt. Analog zu den Ergebnissen im ersten Teil der Studie scheinen Fahrer in komplexen Verkehrssituationen Informationen über den Zustand Ihres Fahrzeugs sowie über die Verkehrssituation und Ihre Position innerhalb des umgebenden Verkehrs zu sammeln. Der erste Blick auf den Tacho ist in einer solchen Situation ein entscheidender Hinweis auf die Geschwindigkeit mit der Fahrer dieses Bewusstsein für Ihre Situation im Verkehr aufbauen. Die Verzögerung dieser Reaktion bei

den automatisiert fahrenden Fahrern – in der vorliegenden Studie manifestiert durch den späteren Blick auf den Tacho – im Vergleich zu manuellen Fahrern könnte ein Hinweis darauf sein, dass Fahrer nach einer langen Phase der automatisierten Fahrt (ca. 1 Stunde) bzw. in einem durch Schlafmangel hervorgerufenen verringerten Wachheitszustand länger brauchen um dieses Bewusstsein für die Lage des Fahrzeugs und die Verkehrssituation

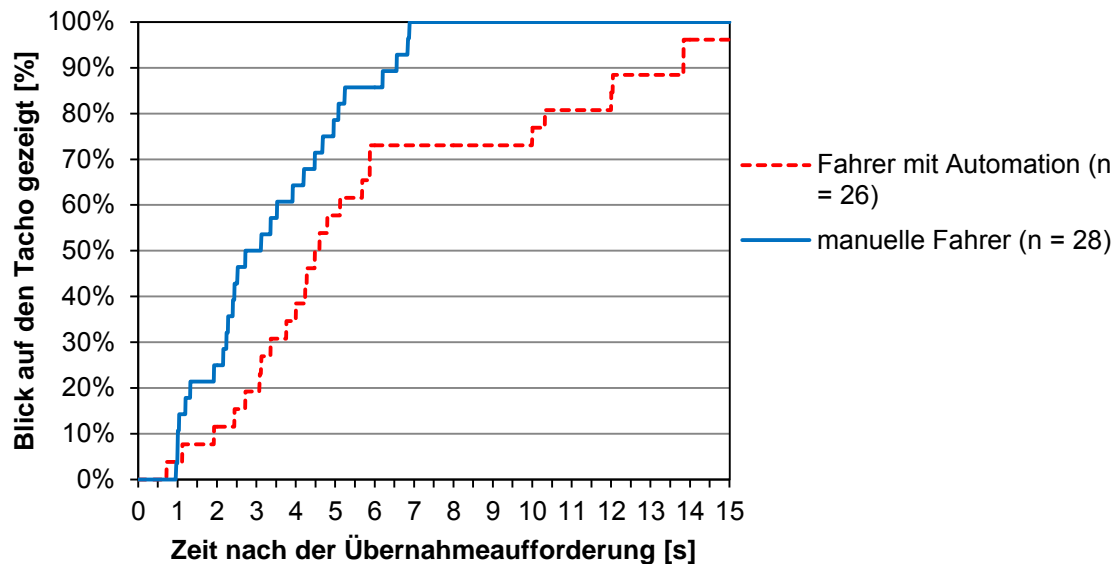


Abbildung 17: Darstellung der anteiligen, kumulativen Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho nach einer Übernahmeaufforderung/Warnung.

aufzubauen.

Verwendet man den Mittelwert der Reaktionszeiten bis zum ersten Blick auf den Tacho, so scheint der Aufbau des Situationsbewusstseins nach einer Phase der automatisierten Fahrt durchschnittlich ca. 3 Sekunden länger zu dauern als bei manuellen Fahrern. Wie jedoch aus Abbildung 17 zu entnehmen ist, bildet der Mittelwert nur unzureichend die Extremwerte der Reaktionen ab. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass zwar 90% der manuellen Fahrer den Blick auf den Tacho nach ca. 6,5 Sekunden ausgeführt hatten, der gleiche Anteil von 90% der automatisiert fahrenden Fahrer aber erst nach ca. 13,8 Sekunden diese Reaktion gezeigt hatte. Eine Erklärung für dieses Muster könnte sein, dass Fahrer mit Automation nach einer Übernahmeaufforderung/Warnung generell länger benötigen um Ihre Umgebung wahrzunehmen und einzuordnen als manuelle Fahrer und dass dieser Effekt durch Schlafmangel und monotone Fahrumgebungen bei bestimmten Personen noch verstärkt wird. In der Versuchsgruppe der Fahrer mit Automation fanden sich jedoch unter den langsamsten 30% der Stichprobe hinsichtlich des ersten Blicks auf den Tacho sowohl Fahrer mit Schlafmangel ($n = 4$) als auch Fahrer nach einer langen Fahrdauer ($n = 3$). Der Effekt scheint also weder primär vom Schlafmangel, noch von einer langen Fahrdauer zu stammen, sondern ein allgemeiner Effekt der Anwesenheit von Automation zu sein. Eine größere Stichprobe von Blickdaten in Übernahmeaufforderungen könnte hier in zukünftigen Studien noch mehr Klarheit über die Ursache des Effekts schaffen.

Das Übernahmeaufforderungsszenario in dieser Studie war so gestaltet, dass kurz nach der Übernahme der manuellen Steuerung nach einer Übernahmeaufforderung auf ein bremsendes vorausfahrendes Fahrzeug reagiert werden musste. Die Versuchsteilnehmer konnten auf dieses bremsende Fahrzeug entweder mit einem Spurwechsel oder durch die Reduktion der eigenen Geschwindigkeit reagieren. Als Reaktionszeit auf dieses kritische Ereignis wurde die

Zeit gemessen zwischen dem Beginn des Bremsens des Vorderfahrzeugs (Bremsleuchten leuchten auf, Reduktion der Geschwindigkeit von 120 km/h auf 80 km/h) und dem Betätigen des Bremspedals um mindestens 10% des maximalen Hub-Wegs. Dieser Grenzwert wurde gewählt um eine eindeutigen Bremsreaktionen von einer sanften Bremsung zur Reduktion der Geschwindigkeit als Reaktion auf den einsetzenden Regen zu unterscheiden.

Für die Messvariable Bremsreaktionszeit fanden sich signifikante Effekte, die jedoch durch die sehr unterschiedlichen Reaktionen auf die Übernahmeaufforderung/Warnung in den verschiedenen Versuchsgruppen nicht eindeutig zu interpretieren sind: Es wurde vermutet, dass Fahrer nach einer Phase der automatisierten Fahrt eher Schwierigkeiten haben auf umgebende Fahrzeuge zu reagieren als manuelle Fahrer. Nach dem Aufleuchten der

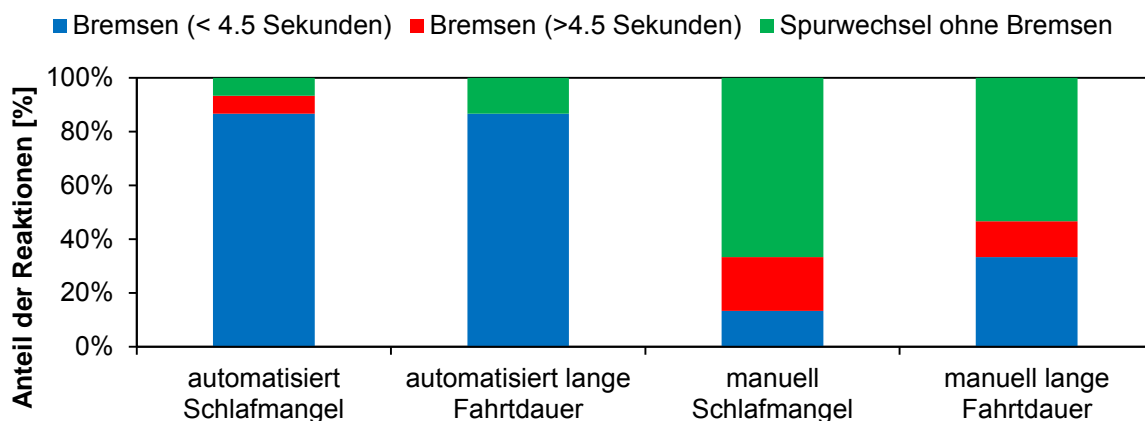


Abbildung 18: Anteil der Reaktionen auf das bremsende, vorausfahrende Fahrzeug nach der Übernahmesituation/Warnung in den einzelnen Versuchsbedingungen.

Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs hatten die Fahrer in dem Szenario ca. 4.5 Sekunden Zeit um entweder durch eine Geschwindigkeitsreduktion oder durch einen Spurwechsel auf das Bremsen zu reagieren. Vor dem Hintergrund des Anteils der Fahrer, die überhaupt eine Bremsreaktion zeigten, wird klar, dass ein deutlich geringerer Anteil der manuellen Fahrer *Bremsen* als angemessene Reaktionsvariante auswählte: 87% der automatisiert fahrenden Fahrer bremste nach dem Auftauchen der Bremslichter innerhalb von maximal 4.5 Sekunden stark ab. Hingegen bremste in der Stichprobe der manuellen Fahrer nur 23% der Fahrer innerhalb dieses Zeitraums. Manuelle Fahrer zeigten hingegen häufig gar keine Bremsreaktion und wechselten stattdessen mit einem Anteil von 60% die Fahrspur, um das bremsende Vorderfahrzeug ohne vorheriges starkes Abbremsen zu überholen. Die Versuchsgruppen waren hiermit hinsichtlich der Art der Reaktion auf das bremsende Vorderfahrzeug auch statistisch gesehen unterschiedlich ($X^2(3, N = 60) = 23.75, p < .01$). Abbildung 18 stellt die anteilige Häufigkeit der Reaktionen der Versuchspersonen noch einmal zusammenfassend dar und Abbildung 19 zeigt die Unterschiede in den Bremsreaktionszeiten der automatisiert fahrenden Gruppen.

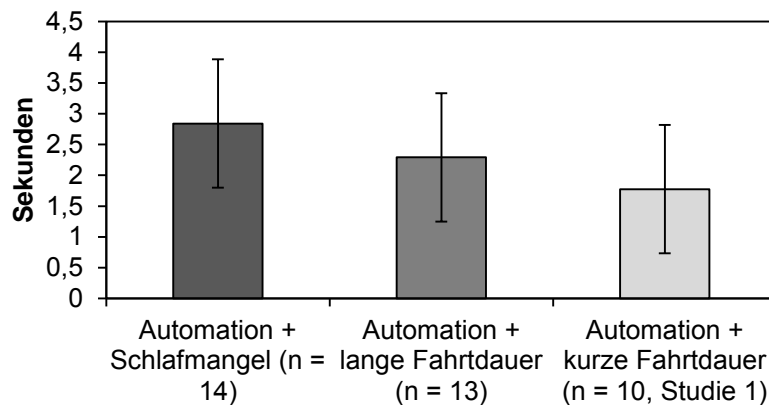


Abbildung 19: Mittlere Bremsreaktionszeit nach dem Auftreten des kritischen Events und Standardabweichungen.

3.4.3. Subjektive Einschätzung der Übernahmesituation

Die Analyse der Fragebogendaten, die jeweils unmittelbar nach den Übernahmesituationen von den Probanden gesammelt wurden ergab, dass Versuchspersonen die Übernahmesituation teilweise als deutlich unangenehm und schlecht kontrollierbar erlebten. Dieser Effekt war besonders ausgeprägt in der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer mit Schlafmangel, die sich auch als am subjektiv stärksten ermüdet einschätzte. Fahrer aus dieser Gruppe bewertete die Übernahmesituation auf einer Skala von 0 (vollständig kontrollierbar) bis 10 (nicht kontrollierbar) im Mittel als $M = 4.6$ ($SD = 2.1$) was ungefähr der Skalenbeschriftung „unangenehm“ entsprach. Die Situation wurde von der Gruppe der manuellen Fahrer mit Schlafmangel auf der gleichen Skala als $M = 2.3$ ($SD = 2.1$) eingestuft, was ungefähr der Skalenbeschriftung „harmlos“ entsprach. Aufgrund der hohen Variabilität der Antworten war dieser Unterschied jedoch statistisch nicht signifikant.

In den Fragen nach Risiko, Beanspruchung und zeitlicher Beanspruchung zeigten sich jeweils ähnliche Tendenzen im Antwortverhalten, die auf eine unterschiedliche subjektive Bewertung der Situationen zwischen den Gruppen „Automation + Schlafmangel“ und „Manuelle Fahrt + Schlafmangel“ hindeuten. Hierbei wurde die Situation in der Gruppe der manuellen Fahrer jeweils als besser kontrollierbar, weniger beanspruchend und weniger risikoreich bewertet als in der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Befragung der Probanden hinsichtlich ihrer subjektiven Wahrnehmung der Übernahmesituation.

Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der subjektiven Befragung der Versuchspersonen hinsichtlich der Übernahme-situation; Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern).

Versuchs- bedingung	Kontrollier- barkeit	Beanspruch- ung	Risiko	Komfort	Zeitliche Beanspruch- ung
Automatisiert Schlafmangel	4.6 (2.1)	8.1 (3.6)	8.5 (4.2)	7.5 (4.0)	8.5 (3.4)
Automatisiert lange Fahrtdauer	3.7 (2.7)	6.9 (3.9)	7.5 (4.0)	7.2 (5.0)	7.9 (4.1)
Manuell Schlafmangel	2.3 (2.1)	6.2 (2.9)	6.5 (2.9)	7.4 (2.5)	7.0 (4.0)
Manuell lange Fahrtdauer	3.8 (2.3)	7.2 (3.2)	6.9 (2.8)	6.2 (3.9)	6.2 (2.5)

3.4.4. Einschränkungen und Limitationen der Ergebnisse

Die oben beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen einer Fahr-simulations-Studie erhoben, die im Jahr 2016 an der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurde. Fahr-simulationsstudien haben sich generell als valides Instrument zur Erhebung von Verhaltensdaten von Fahrern bewährt. Im Vergleich zu einer Realfahrt können trotzdem Unterschiede im Verhalten der Fahrer auftreten, die zum Beispiel mit einem verringerten Risikoempfinden im Simulator zusammen hängen. Dennoch können die Ergebnisse hinsichtlich des Verlaufs der Ermüdung während einer automatisierten Fahrt und hinsichtlich der Reaktionszeiten nach einer Übernahmeaufforderung als erste Hinweise für das Verhalten von Fahrern in echten Fahrzeugen bewertet werden.

Den Fahrern war während der Fahrt nicht bewusst, dass sie beobachtet und hinsichtlich ihrer Müdigkeitsentwicklung bewertet wurden. Nach der Durchführung der Studie wurden die Fahrer über diesen Umstand und den Nutzen der Studie aufgeklärt. Allerdings wussten die Müdigkeitsbewerter über das Ziel der Studie Bescheid und waren außerdem über die Einteilung der Probanden in die Versuchsbedingungen (Automation + Schlafmangel/lange Fahrtdauer, Manuelle Fahrt + Schlafmangel/lange Fahrtdauer) informiert. Hierdurch könnte eine Beeinflussung der Müdigkeitsbewertungen durch das Vorwissen der Bewerter stattgefunden haben. Da die Bewerter die Einstufung der Müdigkeit jedoch nur grob während der Fahrt vornahmen, um den Zeitpunkt der Übernahme festzulegen und hauptsächlich die objektiven Indikatoren der Müdigkeit aufzeichneten, ist das Risiko einer solchen Beeinflussung relativ gering. Auch die hohe Korrelation der Müdigkeitsbewertungen mit den subjektiven Einschätzungen der Müdigkeit spricht für eine hohe Validität der Müdigkeits-Bewertungen durch die geschulten Bewerter. Dennoch sollte die Reliabilität der Bewertungen anhand der aufgezeichneten Videos von zusätzlichen Bewertern überprüft werden um diesen Faktor vollständig auszuschließen. Umgekehrt könnte die intervallweise Bewertung der Müdigkeit in Abständen von 5 Minuten für jeweils 1 Minute dazu geführt haben, dass das Erreichen von Müdigkeitsstufen zwischen den Bewertungen verpasst wurde.

Die Fahrer in dieser Studie erlebten ein realistisches Verhalten einer Automation der Stufe „hochautomatisiertes Fahren“ (nach Gasser et al., 2012). Auch die Übernahme-situation und die Übernahmeaufforderung war entlang der aktuell geforderten Richtlinien gestaltet und bildete eine mit aktuellen Systemen realistische Übernahme-situation nach.

4. Empfehlungen und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich die Reaktionszeitdaten und die aus der Fahrsimulation gesammelten Daten so bewerten, dass ein automatisiert fahrender Fahrer auch aus einem müden oder ermüdeten Zustand heraus zunächst grundsätzlich in der Lage ist, die manuelle Steuerung des Fahrzeugs zu übernehmen. Allerdings zeigte sich bei einigen Fahrern, besonders aus der Teilnehmergruppe mit Schlafmangel, dass in einem solchen Zustand für die Übernahme längere Zeiträume benötigt werden als bei Fahrern in einem aktivierten Zustand. Außerdem können durch Schlafmangel und Ermüdung auch nach der Übernahme der manuellen Steuerung Verzögerungen bei Reaktionen auf den vorausfahrenden Verkehr auftreten.

Die Müdigkeitsverläufe der automatisiert fahrenden Fahrer in dieser Studie machen deutlich, dass eine dauerhafte, sichere Überwachung der Automation durch die Fahrer nicht realistisch umsetzbar ist. Fahrer mit Automation ermüden bereits nach einem Zeitraum von etwa 20 Minuten. Diese Ermüdung wird noch verstärkt durch die vorherige Anwesenheit von Schlafmangel. Soll also eine sichere Automation im Fahrzeug umgesetzt werden, muss entweder die Möglichkeit zur Ablenkung durch die Beschäftigung mit kontrollierbaren Nebenaufgaben, z.B. auf dem fahrzeuginternen Infotainmentsystem, gegeben sein oder die Automation muss den Fahrerzustand ständig überwachen und den Fahrer gegebenenfalls regelmäßig wieder in die manuelle Kontrollschleife zurückholen.

In Anlehnung an den ersten Teil dieser Studienreihe konnte gezeigt werden, dass automatisiert fahrende Fahrer auch nach der Übernahme der manuellen Steuerung Zeit benötigen, um ihre Fahrumgebung zu verstehen und ein Bewusstsein für den Zustand des eigenen Fahrzeugs in der Verkehrssituation aufzubauen. In dieser Studie konnte diese Verzögerung des Aufbaus eines Situationsbewusstseins unter anderem durch die im Vergleich zu den manuellen Fahrern verspäteten Blicke auf den Tacho gezeigt werden. Auch der deutlich geringere Anteil an Spurwechseln als Reaktion auf ein bremsendes Vorderfahrzeug in der Gruppe der automatisiert fahrenden Fahrer deutet darauf hin, dass Fahrer in solch einer Situation versuchen, sich zusätzliche Zeit zu verschaffen und die Situation zu entschärfen, anstatt wie die manuellen Fahrer dynamisch zu reagieren und ihr Fahrverhalten anzupassen.

Im Vergleich zu Studie 1 (Vogelpohl et al., 2016) ergaben sich somit bei ermüdeten automatisiert fahrenden Fahrern Reaktionszeiten und Reaktionsmuster, die am ehesten mit stark durch eine motivierende Nebenaufgabe abgelenkten automatisierten Fahrern zu vergleichen sind. Diese Vergleichbarkeit verdeutlicht noch einmal die Notwendigkeit einer Überwachung des Fahrerzustands für die Sicherheit des Übernahmeprozesses durch den Fahrer bei hohen Stufen der Automatisierung: Für die Definition einer sicheren Übernahmedauer sollte das System jederzeit wissen, in welchem Zustand sich der Fahrer befindet (abgelenkt, müde, gelangweilt, etc.), um Warnungen und Warnzeiträume entsprechend gestalten zu können oder um präventive Rückführungen zur manuellen Steuerung durchzuführen, wenn eine schnelle und sichere Reaktion des Fahrers nicht mehr vorausgesetzt werden kann.

Werden analog zum ersten Studienteil Anteile von 90% der Fahrer als Kriterium angelegt, so schalteten die automatisiert fahrenden Fahrer in dieser Studie aus einem ermüdeten Zustand heraus die Automation nach ca. 5-7 Sekunden ab. Diese Fahrer hatten während der Fahrt keine Möglichkeit zur Bearbeitung einer ablenkenden Nebenaufgabe und konnten nur das

Verhalten der Automation beobachten. 90% der Fahrer aus dieser Stichprobe hatten nach ca. 2-3 Sekunden ihre Hände wieder am Lenkrad und nach ca. 4-5 Sekunden die Füße wieder an den Pedalen. Der Blick der Fahrer wurde während der Fahrt kaum von der Fahraufgabe abgelenkt, sodass die Fahrer die Straßenmitte bereits nach weniger als einer Sekunde wieder anschauten. Verwendet man als Maß für den Aufbau des Situationsbewusstseins nach der Übernahmeaufforderung den ersten Blick auf den Tacho, so scheinen Fahrer erst nach ca. 12-15 Sekunden ein Bild von der Fahrsituation aufgebaut zu haben.

Fahrer sollten demnach über den Zeitraum bis zur Deaktivierung der Automation hinaus bei der Übernahme der manuellen Steuerung unterstützt werden. Fahrer schalten die Automation zwar einigermaßen zuverlässig und relativ schnell nach der Übernahmeaufforderung ab. Es kann jedoch zum Zeitpunkt der Deaktivierung nicht immer davon ausgegangen werden, dass sich die Fahrer ihrer Position innerhalb der Verkehrssituation bewusst sind bzw. dass sie das aktuelle Fahrzeugverhalten hinsichtlich Geschwindigkeiten und Beschleunigungen korrekt einschätzen können. Fahrer sollten somit in der Zukunft während der Phase des Aufbaus eines Situationsbewusstseins nach einer Übernahmeaufforderung gezielt durch Assistenzsysteme unterstützt werden, um Fehlverhalten und unangemessene Reaktionen nach der Übernahme der Steuerung zu vermeiden und ein verfrühtes Abschalten der Automation zu verhindern.

Zukünftige Studien sollten den Aufbau des Situationsbewusstseins während des Übergangs vom automatisierten Fahren zur manuellen Steuerung genauer betrachten, um Hinweise auf Defizite bei der Wahrnehmung von potenziellen Gefahren in einer solchen Situation zu erhalten. Das Wissen über den Aufbau des Situationsbewusstseins während dieses Übergangs kann als Basis für die Gestaltung von Assistenzsystemen dienen, die den Fahrer nach einer hochautomatisierten Fahrt gezielt unterstützen. Zusätzlich sollten Fahrerzustände während der hochautomatisierten Fahrt einen Fokus zukünftiger Forschung darstellen. Aktuell ist nicht bekannt, wie sich verschiedenste Fahrerzustände wie Müdigkeit, Stress oder Wut auf die Wahrscheinlichkeit zur Initiierung eines Übergangs vom automatisierten Fahren zum manuellen Fahren auswirken und wie diese Zustände den Ablauf des Übergangs beeinflussen.

5. Literatur

ADAC. (2012). *Müdigkeit im Straßenverkehr*. ADAC e.V., Ressort Verkehr: München, online abgerufen am 28.02.2017.

Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1-2), 29-37.

Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2005). Impaired alertness and performance driving home from the night shift: a driving simulator study. *Journal of sleep research*, 14(1), 17-20.

Kecklund, G., & Åkerstedt, T. (1993). Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving. *Ergonomics*, 36(9), 1007-1017.

Åkerstedt, T. (1995). Work hours, sleepiness and the underlying mechanisms. *Journal of sleep research*, 4(s2), 15-22.

Belyavin, A., & Wright, N. A. (1987). Changes in electrical activity of the brain with vigilance. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 66(2), 137-144.

BMVI. (2011). *Verkehrssicherheitsprogramm 2011*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Referat LA 26: Berlin, online abgerufen am 28.02.2017.

Karrer, K., Briest, S., Vöhringer-Kuhnt, T., Baumgarten, T., & Schleicher, R. (2005). Driving without awareness. *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application*, 455-469.

Brookhuis, K., Waard, D. D., & Mulder, B. E. N. (1994). Measuring driving performance by car-following in traffic. *Ergonomics*, 37(3), 427-434.

Brown, I. D. (1994). Driver fatigue. *Human factors*, 36(2), 298-314.

Camkin, H. (1990). Introduction: fatigue and road safety. Road Traffic Authority. CR 2:90, *Workshop on driver fatigue: report on proceedings*. (Ed. M. Henderson).

Connor, J., Whitlock, G., Norton, R., & Jackson, R. (2001). The role of driver sleepiness in car crashes: a systematic review of epidemiological studies. *Accident Analysis & Prevention*, 33(1), 31-41.

Cummings, P., Koepsell, T. D., Moffat, J. M., & Rivara, F. P. (2001). Drowsiness, countermeasures to drowsiness, and the risk of a motor vehicle crash. *Injury Prevention*, 7(3), 194-199.

Davies, D. R., & Parasuraman, R. (1982). *The psychology of vigilance*. Academic Press.

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

Dinges, D. F., & Kribbs, N. B. (1991). Performing while sleepy: Effects of experimentally-induced sleepiness.

- Dinges, D. F. (1995). An overview of sleepiness and accidents. *Journal of sleep research*, 4(s2), 4-14.
- Dittrich, E., Brandenburg, S., & Thüning, M. (2009). Beobachtungsbasierte Erfassung von Müdigkeit im Kfz–die TUBS-Skala. *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme*, 8, 123-128.
- Dorrian J, Lamond N, Holmes AL, Burgess HJ, Roach GD, Fletcher A, & Dawson D. (2003). The ability to self-monitor performance during a week of simulated night shifts. *Sleep*, 26(7):871–877.
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human factors*, 37(2), 381-394.
- eSafety Forum. (2005) Final report and recommendations of the implementation road map working group, online abgerufen am 28.02.2017.
- Evers, C., & Auerbach, K. (2005). Verhaltensbezogene Ursachen schwerer Lkw-Unfälle. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit*, (174).
- Fairclough, S. H. (1997). *Monitoring driver fatigue via driving performance* (pp. 363-379). Lawrence Erlbaum Associates.
- Feldhütter, A., Gold, C., Schneider, S., & Bengler, K. (2016). How the Duration of Automated Driving Influences Take-Over Performance and Gaze Behavior. In *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (p. 62).
- Fletcher, A., McCulloch, K., Baulk, S. D., & Dawson, D. (2005). Countermeasures to driver fatigue: a review of public awareness campaigns and legal approaches. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 29(5), 471-476.
- Gasser, T. M., & Westhoff, D. (2012). BASt-study: Definitions of automation and legal issues in Germany. In *Proceedings of the 2012 Road Vehicle Automation Workshop*.
- Gonçalves, J., Happee, R., & Bengler, K. (2016). Drowsiness in Conditional Automation: Proneness, diagnosis and driving performance effects. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on* (pp. 873-878). IEEE.
- Groeger, J. A. (2006). Youthfulness, inexperience, and sleep loss: the problems young drivers face and those they pose for us. *Injury prevention*, 12(suppl 1), i19-i24.
- Hamelin, P. (1987). Lorry driver's time habits in work and their involvement in traffic accidents. *Ergonomics* 30. 1323-1333.
- Hargutt, V. (2007) Präsentation "Müdigkeit im Verkehr – Entstehung, Unfallrisiko und Gegenmaßnahmen". Forum Protect: Würzburg, online abgerufen am 28.02.2017.
- Hargutt, V., Hoffmann, S., Vollrath, M., & Kruger, H. P. (2001). Compensation for Drowsiness and Fatigue: A Driving Simulator Study. In *International Conference on Traffic and Transport Psychology*. ICTTP 2000, Bern, Schweiz.

- 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.
- Hartley, L., Horberry, T., Mabbott, N., & Krueger, G. P. (2000). Review of fatigue detection and prediction technologies. *National Road Transport Commission*.
- Horne, J. A., & Reyner, L. A. (1995). Sleep related vehicle accidents. *Bmj*, 310(6979), 565-567.
- Horne, J. A., & Reyner, L. A. (1996). Counteracting driver sleepiness: effects of napping, caffeine, and placebo. *Psychophysiology*, 33(3), 306-309.
- van der Hulst, M., Meijman, T., & Rothengatter, T. (2001). Maintaining task set under fatigue: a study of time-on-task effects in simulated driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 4(2), 103-118.
- Ingre, M., Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2006). Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: examining individual differences. *Journal of sleep research*, 15(1), 47-53.
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M., & Lai, F. C. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation research part C: emerging technologies*, 30, 116-125.
- Joiko, K., Schmauder, M. & Wolff, G. (2010). Psychische Belastung und Beanspruchung im Berufsleben. Erkennen – Gestalten. 5. Auflage. BAuA: Dortmund. Kaber et al., 2006
- Kaida, K., Takahashi, M., Åkerstedt, T., Nakata, A., Otsuka, Y., Haratani, T., & Fukasawa, K. (2006). Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clinical Neurophysiology*, 117(7), 1574-1581.
- Karrer, K., Briest, S., Vöhringer-Kuhnt, T., Baumgarten, T., & Schleicher, R. (2005). Driving without awareness. *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application*, 455-469.
- Kecklund, G., & Åkerstedt, T. (1993). Sleepiness in long distance truck driving: an ambulatory EEG study of night driving. *Ergonomics*, 36(9), 1007-1017.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data.
- Knipling, R. F., & Wierwille, W. W. (1994). *Vehicle-based drowsy driver detection: Current status and future prospects*. National Highway Traffic Safety Administration, Office of Crash Avoidance Research.
- 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.
- Krueger, H. P., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB - A task-oriented driving simulation. In Proceedings of the driving simulator conference (DSC). Orlando (pp. 232-331).

- Lal, S. K. L., & Craig, A. (2000). Psychophysiological effects associated with drowsiness: Driver fatigue and electroencephalography. In *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 35, No. 1, pp. 39-39.
- Lal, S. K., & Craig, A. (2001). A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological psychology*, 55(3), 173-194.
- Langwieder, K., Sporer, A., & Hell, W. (1994). Struktur der Unfälle mit Getöteten auf Autobahnen im Freistaat Bayern im Jahr 1991: ein Beitrag zur Analyse des Unfallgeschehens. HUK-Verb., Büro für Kfz-Technik.
- Lin, C. T., Wu, R. C., Jung, T. P., Liang, S. F., & Huang, T. Y. (2005). Estimating driving performance based on EEG spectrum analysis. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005, 3165-3174.
- Lyznicki, J. M., Doege, T. C., Davis, R. M., & Williams, M. A. (1998). Sleepiness, driving, and motor vehicle crashes. *Jama*, 279(23), 1908-1913.
- May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(3), 218-224.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C., & Carsten, O. (2012). Highly automated driving, secondary task performance, and driver state. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 762-771.
- Miller, D., Sun, A., Johns, M., Ive, H., Sirkin, D., Aich, S., & Ju, W. (2015). Distraction becomes engagement in automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 59, No. 1, pp. 1676-1680). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Muttray, A., Hagenmeyer, L., Unold, B., Prel, J., & Geissler, B. (2007). Videoanalyse der Schlaftrigkeit von Fahrern-eine Pilotstudie. *Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin*, 42(3), 184.
- Neubauer, C., Matthews, G., Langheim, L., & Saxby, D. (2012). Fatigue and voluntary utilization of automation in simulated driving. *Human factors*, 54(5), 734-746.
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. *VDI-Berichte*, 1791, 297-318
- O'Hanlon, J. F., & Kelley, G. R. (1977). Comparison of performance and physiological changes between drivers who perform well and poorly during prolonged vehicular operation. In *Vigilance* (pp. 87-109). Springer US.
- Pack, A. I., Pack, A. M., Rodgman, E. A., Cucchiara, A., Dinges, D. F., & Schwab, C. W. (1994). Characteristics of accidents attributed to the driver having fallen asleep. In *Annual proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine* (Vol. 38, pp. 395-405). Association for the Advancement of Automotive Medicine.

- Parasuraman, R., & Davies, D. R. (1977). A taxonomic analysis of vigilance performance. In *Vigilance* (pp. 559-574). Springer US.
- Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance.
- Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C., & Bioulac, B. (2005). Fatigue, sleep restriction and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 473-478.
- Riemersma, J. B. J., Sanders, A. F., Wildervanck, C., & Gaillard, A. W. (1977). Performance decrement during prolonged night driving. In *Vigilance* (pp. 41-58). Springer US.
- Rogers, N. L., Dorrian, J., & Dinges, D. F. (2003). Sleep, waking and neurobehavioural performance. *Frontiers of Bioscience*, 8, s1056-s1067.
- Rosekind, M. R., Gander, P. H., Miller, D. L., Gregory, K. B., Smith, R. M., Weldon, K. J., ... & Lebacqz, J. V. (1994). Fatigue in operational settings: examples from the aviation environment. *Human factors*, 36(2), 327-338.
- SAE, Society of Automotive Engineers (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Surface Vehicle Information Report J3016, 1-12. http://standards.sae.org/j3016_201401/, online abgerufen am 28.02.2017.
- SafetyNet. (2009). Fatigue. Research report for the European Commission, Directorate-General Transport and Energy, abgerufen am 24.01.2017
- Sagberg, F. (1999). Road accidents caused by drivers falling asleep. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 639-649.
- Skipper, J. H., & Wierwille, W. W. (1986). Drowsy driver detection using discriminant analysis. *Human Factors*, 28(5), 527-540.
- Statistisches Bundesamt. (2015). Anzahl der durch Übermüdung verursachten Verkehrsunfälle mit Personenschaden in Deutschland von 1991 bis 2015. In *Statista - Das Statistik-Portal*, abgerufen am 20. Februar 2017, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317703/umfrage/unfaelle-mit-personenschaden-uebermuedung/>.
- StepStone. (2012). Wie lange benötigen Sie für die tägliche Fahrt zur Arbeitsstelle?. In *Statista - Das Statistik-Portal*. abgerufen am 24. Januar 2017, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/245765/umfrage/fahrzeiten-fuer-arbeitnehmer-im-pendelverkehr/>.
- Stutts, J. C., Wilkins, J. W., Osberg, J. S., & Vaughn, B. V. (2003). Driver risk factors for sleep-related crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 35(3), 321-331.
- Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 35(3), 381-391.
- Vanlaar, W., Simpson, H., Mayhew, D., & Robertson, R. (2008). Fatigued and drowsy driving: A survey of attitudes, opinions and behaviors. *Journal of Safety Research*, 39(3), 303-309.

Verwey, W. B., & Zaidel, D. M. (2000). Predicting drowsiness accidents from personal attributes, eye blinks and ongoing driving behaviour. *Personality and individual differences*, 28(1), 123-142.

Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., & Vollrath, M. (2016). Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. Teil 1: Review der Literatur und Studie zu Übernahmezeiten. *Forschungsbericht Nr. 39*, Berlin: Unfallforschung der Versicherer, GDV.

Vöhringer-Kuhnt, T., Baumgarten, T., Karrer, K., & Briest, S. (2004). Wierwille's method of driver drowsiness evaluation revisited. In *Conference Proceedings of the International Conference on Traffic and Transportation Psychology* (Vol. 3, pp. 5-9).

Weeß H.G., Sauter C., Geisler P., Böhning W., Wilhelm B., Rotte M., Gresele C., Schneider C., Schulz H., Lund R., & Steinberg R. (2000). Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schläfrigkeit - Diagnostische Instrumentarien zur Messung müdigkeits- und schläfrigkeitsbezogener Prozesse und deren Gütekriterien. *Somnologie* 4, 20-38.

Wiegand, D. M., McClafferty, J., McDonald, S. E., & Hanowski, R. J. (2009). Development and evaluation of a naturalistic observer rating of drowsiness protocol. *National Surface Transportation Safety Center for Excellence Reports (NSTSCE, VTTI)*, 40.

Wierwille, W. W., & Ellsworth, L. A. (1994). Evaluation of driver drowsiness by trained raters. *Accident Analysis & Prevention*, 26(5), 571-581.

Wilhelm B, Lüdtke H, Warga M, Neugebauer P, Heneka C, & Stuibler G. (2004). Standard des Pupillographischen Schläfrigkeitstests(PST). *Somnologie* 8(Suppl 1): 80.

Williamson, A., & Chamberlain, T. (2005). Review of on-road driver fatigue monitoring devices. *University of New South Wales*, 43-52.

Williamson, A. M., Feyer, A. M., & Friswell, R. (1996). The impact of work practices on fatigue in long distance truck drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 28(6), 709-719.

Williamson, A. M., & Feyer, A. M. (2000). Moderate sleep deprivation produces impairments in cognitive and motor performance equivalent to legally prescribed levels of alcohol intoxication. *Occupational and environmental medicine*, 57(10), 649-655.

Van Winsum, W. (1999). The human element in car following models. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 2(4), 207-211.

Wright, N. A., Stone, B. M., Horberry, T. J., & Reed, N. (2007). *A review of in-vehicle sleepiness detection devices*. Published Project Report PBR Nr. 157, Transport Research Laboratory: London, England.

6. Anhang: Fragebogen nach der Übernahme-situation

Wie war die vorangegangene Situation nach der Warnung?

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

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

Wie beanspruchend war die vorangegangene Situation?

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

Wie risikoreich war die vorangegangene Situation?

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

War die Situation unkomfortabel?

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

Wie dringlich oder hastig war die Situation?

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

Warum hat das Fahrzeug Sie Ihrer Meinung nach gewarnt?

Wie beurteilen Sie Ihren Zustand unmittelbar vor der Warnung?

Sehr wach		Wach		Weder wach noch müde		Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben		Sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend

Was haben Sie getan um sich während der Fahrt wach zu halten?

Ich habe nichts getan um mich wach zu halten.

Wie beurteilen Sie Ihren aktuellen Zustand?

Sehr wach		Wach		Weder wach noch müde		Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben		Sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend

Wie nützlich ist die von Ihnen erlebte Funktion?

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

Würden Sie in Erwägung ziehen ein Fahrzeug mit einer solchen Funktion zu kaufen?

Sehr unwahrscheinlich			Wenig wahrscheinlich			Neutral			Wahrscheinlich			Sehr wahrscheinlich		
-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+



Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

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

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