
**Die Übernahmeleistung des Fahrers
im hochautomatisierten Fahren
in Abhängigkeit von Merkmalen fahrfremder Tätigkeiten
und Art der Übernahmeaufforderung**

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



Vorgelegt von
Dennis Befelein
aus Würzburg

Würzburg

2023

Erstgutachter: Professor Dr. Wilfried Kunde

Zweitgutachter: Professor Dr. Lynn Huestegge

Tag des Kolloquiums: 23.06.2023

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts „Ko-HAF“ am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH).

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Wilfried Kunde für die Erstbetreuung dieser Arbeit und die damit verbundenen wertvollen Ideen und anregenden Kommentare. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr. Lynn Huestegge sowie Frau Prof. Dr. Tanja Bipp als weiteren Gutachtern für das Interesse an meiner Arbeit danken. Für die fundierte methodische Ausbildung bereits während des Psychologiestudiums sowie den produktiven Austausch während der Entstehung dieser Arbeit gebührt mein großer Dank Herrn Dr. Rainer Scheuchenpflug.

Darüber hinaus danke ich Alexandra Neukum, die mit dem BMWi-Projekt die Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit erst geschaffen hat, herzlich für ihre wertvolle Unterstützung. Ein großes Dankeschön geht an die Kollegen der WIVW GmbH: Dr. Frederik Naujoks für die Betreuung bei der Studienkonzeption von Beginn des Projekts an. Meinen Kollegen Florian Fischer, Martin Grein und Christian Mark für die Einbindung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und Mathias Gold für den Einbau von Hardware in die Fahrsimulatoren. Andreas Landau für die Einrichtung der Videokodierung. Juliane Boschet für die wichtigen Vorarbeiten in ihrer Masterarbeit. Den zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräften für Ihre Unterstützung bei der Studienvorbereitung und Datenerhebung. Und selbstverständlich Sonja Hoffmann für die Probandenrekrutierung aus dem Teilnehmer-Panel des WIVW.

Besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie. Chris und Dominik danke ich für ihre wertvollen Kommentare zur Arbeit und ihren kontinuierlichen Zuspruch. Meinen Eltern für die Vermittlung von Herz, Humor und Verstand sowie ihre bedingungslose und liebevolle Unterstützung auf meinem Lebensweg. Mein größter Dank geht an meine Frau Katrin für ihren Rat, ihre Geduld und ihre Liebe.

Zusammenfassung

Im Zuge des technischen Fortschritts ist das hochautomatisierte Fahren nach SAE Level 3 (SAE, 2018) in den vergangenen Jahren in greifbare Nähe gerückt. Es ist damit zu rechnen, dass Fahrzeuge in naher Zukunft zumindest bei Vorliegen einer Reihe strikter Rahmenbedingungen den Fahrer phasenweise von der Fahraufgabe entbinden können. Letzterer muss die Fahrzeugautomation während dieser Phasen nicht überwachen und kann sich anderen Tätigkeiten zuwenden. An Systemgrenzen oder bei Systemfehlern (Gold, Naujoks, Radlmayr, Bellem & Jarosch, 2017) stellt er jedoch die Rückfallebene dar und muss die Fahrzeugkontrolle innerhalb eines angemessenen Zeitraumes übernehmen, sobald ihn das Fahrzeug dazu auffordert. Diese Rückübertragung der Fahraufgabe an den Fahrer stellt ein kritisches Nadelöhr für die Sicherheit und Akzeptanz automatisierter Fahrsysteme dar. Aus psychologischer Perspektive handelt es sich hierbei um Aufgabenwechsel. Diese gehen in Experimenten der kognitiven und angewandten Psychologie zuverlässig mit Kosten einher, welche sich in verlängerten Reaktionszeiten und erhöhten Fehlerraten bei der Aufgabebearbeitung niederschlagen. Insbesondere im Bereich des automatisierten Fahrens liegen zahlreiche Belege vor, dass der Wechsel zwischen automatisiertem und manuellem Fahren zu einer Verschlechterung der Fahrleistungen gegenüber dem manuellen Fahren führen kann.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesen Übergängen und fokussiert dabei die Tätigkeiten, denen Fahrer während der hochautomatisierten Fahrabschnitte nachgehen können. Vier Experimente im Fahrsimulator betrachten die Auswirkungen unterschiedlicher Aspekte fahrfremder Tätigkeiten (FFT) in Übernahme-situationen sowie deren Zusammenwirken mit unterschiedlichen Übernahmeaufforderungen.

Im ersten Experiment wird zunächst der Frage nachgegangen, inwiefern sich die Vielzahl denkbarer und zu erwartender FFT durch übergeordnete und damit systematisch untersuchbare Merkmale auszeichnet und welche dies gegebenenfalls sind. Im zweiten Experiment werden anschließend die relevantesten Merkmale, Unterbrechungsaufwand und Anreiz zur Weiterbearbeitung der Aufgabe daraufhin untersucht, welchen Einfluss sie auf Fahrerleistungen in Übernahme-situationen ausüben. Im dritten Experiment wird der Frage nachgegangen, welches Potenzial solche Übernahmeaufforderungen besitzen, deren Dringlichkeit adaptiv ist hinsichtlich des jeweiligen Aufwandes der Aufgabenunterbrechung sowie des jeweiligen Anreizes zur Weiterbearbeitung der Aufgabe. Im vierten Experiment wird ein Übernahmekonzept untersucht, bei dem der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung adaptiv ist hinsichtlich des jeweiligen Aufwandes der Aufgabenunterbrechung.

Die vorliegende Arbeit kann mit dem Unterbrechungsaufwand und dem Bearbeitungsanreiz zwei in L3-Übernahme-situationen wesentliche Merkmale fahrfremder Tätigkeiten identifizieren (Studien 1 und 2). Darüber hinaus wird eine experimentelle Variation des Unterbrechungsaufwandes erbracht und deren Effekte abgebildet (Studie 2). Durch den Vergleich adaptiver und nicht adaptiver Transitionskonzepte werden die

Vorteile von Adaptivität im Rahmen von L3-Übernahmesituationen experimentell herausgearbeitet (Studien 3 und 4).

Summary

In the course of technological progress, highly automated driving according to SAE level 3 (SAE, 2018) has come within reach. It is to be expected that in the near future vehicles can temporarily dispense the driver from the driving task if a series of strict framework conditions are fulfilled. During highly automated phases the driver does not have to monitor vehicle automation and can dedicate himself to other activities. However, at system boundaries or in case of system failures (Gold, Naujoks, et al., 2017) he constitutes the fallback level and has to take over vehicle control within an appropriate timespan whenever the vehicle requests him to. This reassignment of the driving task to the driver is a critical bottleneck with regards to safety and acceptance of automated driving systems. From a psychological point of view this is an issue of task switching. In experiments of cognitive and applied psychology task switches regularly come along with costs that reflect in extended reaction times and augmented error rates in the tasks. Especially with regard to automated driving there is strong evidence that the switch between automated and manual driving may lead to a deterioration of driving performance in comparison to manual driving.

The present work focuses on non-driving related tasks (NDRTs) that drivers may perform during phases of highly automated driving. Four driving simulator studies examine the effects of different aspects of NDRTs in takeover situations as well as their interaction with different takeover requests.

The first experiment examines if the plethora of imaginable NDRTs do have superordinate and thereby systematically investigable features in common and which these features are. In another experiment, the most relevant features, effort of task interruption and incentive to continue the task, are examined in view of their influence on driving performance in takeover situations. The third experiment explores the potential of takeover requests whose urgency matches the respective task interruption effort and incentive to continue the task. The fourth experiment scrutinizes a transition concept in which the timing of the takeover request matches the respective effort of task interruption.

With the effort of task interruption and the incentive to continue the task, the present work can identify two features of NDRT that are relevant in L3 takeover situations (study 1 and 2). Beyond that, the experimental variation of interruption effort and the illustration of its effects are provided (study 2). By comparing adaptive and non-adaptive transition concepts, the benefit of adaptiveness in the context of L3 takeover situations is experimentally demonstrated (studies 3 and 4).

Inhalt

1	Einführung.....	11
1.1	Automatisiertes Fahren: Ein kurzer historischer Abriss	11
1.2	Gesetzeslage zum autonomen Fahren und aktueller Stand der technischen Entwicklung.....	12
1.3	Nutzen und Risiken.....	14
1.4	Aufbau und Ziele der vorliegenden Arbeit	16
2	Theoretischer Hintergrund	17
2.1	Hochautomatisiertes Fahren.....	17
2.1.1	Beschreibung und Begriffsklärung.....	17
2.1.2	Abgrenzung zu teil- und vollautomatisiertem Fahren	19
2.2	L3-Übernahmesituationen.....	20
2.2.1	Relevanz in Forschung und Testpraxis.....	20
2.2.2	Anforderungen an den Fahrer.....	21
2.2.3	Allgemeinpsychologische Grundlagen: Aufgabenwechsel	22
2.2.4	Merkmale fahrfremder Tätigkeiten in L3-Übernahmesituationen	32
2.2.5	Adaptive Transitionskonzepte im L3-Fahren	42
2.3	Zwischenfazit	46
3	Simulatorstudien	48
3.1	Empirische Fragestellungen und Hypothesen.....	48
3.1.1	Durch welche in Übernahmesituationen relevanten übergeordneten Merkmale zeichnen sich natürliche fahrfremde Tätigkeiten im Besonderen aus?	48
3.1.2	Welchen Einfluss haben diese Merkmale auf die Übernahmeleistung des Fahrers?	48
3.1.3	Welches Potenzial besitzen Übernahmeaufforderungen, die adaptiv sind in Bezug auf diese Merkmale?	48
3.2	Methoden	49
3.2.1	Fahrsimulation.....	49
3.2.2	Automatisierte Fahrfunktion	50
3.2.3	Statistische Auswertungsverfahren	50
3.2.4	Stichproben.....	51
3.3	Studie 1: Einflüsse naturalistischer fahrfremder Tätigkeiten auf Übernahmekriterien im hochautomatisierten Fahren	52
3.3.1	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	52
3.3.2	Prüfszenario.....	52
3.3.3	Unabhängige Variable	53
3.3.4	Abhängige Variablen.....	55

3.3.5	Versuchsplan	56
3.3.6	Versuchsablauf	56
3.3.7	Ausschluss von Daten.....	57
3.3.8	Ergebnisse	58
3.3.9	Zwischenfazit und Diskussion.....	62
3.4	Studie 2: Übernahmeleistung im hochautomatisierten Fahren in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Anreiz der fahrfremden Tätigkeit	64
3.4.1	Prüfszenario.....	64
3.4.2	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	64
3.4.3	Unabhängige Variablen	65
3.4.4	Abhängige Variablen.....	66
3.4.5	Versuchsplan	67
3.4.6	Versuchsablauf	67
3.4.7	Ausschluss von Daten.....	68
3.4.8	Ergebnisse	69
3.4.9	Zwischenfazit und Diskussion.....	73
3.5	Studie 3: Adaptive Transitionskonzepte als Mittel zur Vermeidung unerwünschter Habituationseffekte des Fahrers in Übernahmesituationen.....	74
3.5.1	Prüfszenario.....	74
3.5.2	Unabhängige Variablen	74
3.5.3	Abhängige Variablen.....	76
3.5.4	Versuchsplan	77
3.5.5	Versuchsablauf	78
3.5.6	Hypothesen.....	79
3.5.7	Ausschluss von Daten.....	79
3.5.8	Ergebnisse	80
3.5.9	Zwischenfazit und Diskussion.....	90
3.6	Studie 4: Adaptive Transitionskonzepte als Mittel zur Förderung erwünschter Verhaltensadaptation des Fahrers in Übernahmesituationen	92
3.6.1	Prüfszenario.....	92
3.6.2	Unabhängige Variablen	92
3.6.3	Abhängige Variablen.....	93
3.6.4	Versuchsplan	94
3.6.5	Versuchsablauf	94
3.6.6	Hypothesen.....	95
3.6.7	Ausschluss von Daten.....	96

3.6.8	Ergebnisse	96
3.6.9	Zwischenfazit und Diskussion.....	101
3.7	Generelle Diskussion	103
3.7.1	Merkmale natürlicher fahrfremder Tätigkeiten mit Relevanz in Übernahme-situationen..	103
3.7.2	Der Einfluss der Tätigkeitsmerkmale auf die Übernahmeleistung des Fahrers.....	103
3.7.3	Das Potenzial adaptiver Übernahmekonzepte	105
3.7.4	Grenzen der vorliegenden Untersuchungen	106
4	Ausblick	108
5	Literaturverzeichnis.....	109

1 Einführung

Kaum ein Forschungsfeld der Verkehrswissenschaft hat in den vergangenen zehn Jahren mehr Aufmerksamkeit auf sich gezogen als das automatisierte Fahren – sowohl im öffentlichen als auch im wissenschaftlichen Diskurs. Die Idee selbstfahrender Autos existiert zwar bereits seit Anfang des vergangenen Jahrhunderts, aber erst in den vergangenen 30 Jahren hat die Entwicklung serienreifer Systeme bedeutend an Fahrt gewonnen und mit ihr die Erforschung des automatisierten Fahrens. Hoffnungen wie Befürchtungen sind mit der neuen Technologie verbunden und viele technische, juristische, aber auch psychologische Fragen sind noch nicht ausreichend beantwortet. Eine besondere Herausforderung der Praxis stellen sogenannte Übernahmesituationen dar. Vereinfacht sind damit Situationen gemeint, in denen der Fahrer¹ nach einem Abschnitt automatisierten Fahrens die Fahrzeugkontrolle wieder selbst übernehmen muss. Wie an späterer Stelle erörtert, werden diese Situationen regelmäßig auftreten und nicht immer auf einen optimal vorbereiteten Menschen am Steuer treffen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass dieser sich im Moment der Übernahmeaufforderung mit einer wie auch immer gearteten „fahrfremden“ Tätigkeit beschäftigen wird. Die vorliegende Arbeit soll beleuchten, wie sich unterschiedliche fahrfremde Tätigkeiten am Steuer (z. B. Lesen, Smartphone-Bedienung etc.) in Übernahmesituationen auswirken und wie sich Übernahmeaufforderungen an den Fahrer besonders wirksam und akzeptabel gestalten lassen.

In den folgenden einleitenden Abschnitten wird zunächst ein kurzer Überblick über die Geschichte des automatisierten Fahrens gegeben. Anschließend werden der aktuelle Stand der Entwicklungen und die Prognosen zur Serienreife des autonomen Fahrens anhand einiger ausgewählter Konzerne dargelegt. Nach einer kurzen Diskussion des möglichen Nutzens und Risikos des automatisierten Fahrens werden schließlich die Ziele der vorliegenden Arbeit abgesteckt und deren Aufbau skizziert.

1.1 Automatisiertes Fahren: Ein kurzer historischer Abriss

Der Übergang vom manuellen zum automatisierten Fahren wird häufig als mehr oder weniger grundlegende Veränderung menschlicher Mobilität beschrieben. Aus technischer Perspektive handelt es sich dabei aber eher um das Beschreiten der nächsten Stufe einer evolutionären Entwicklung von Assistenzsystemen, welche bis heute immer wieder von ambitionierten „Leuchtturmprojekten“ vorangetrieben wurde.

Die Visionen und Versuche zur Automatisierung des Fahrens reichen bis in den Anfang des 20. Jahrhunderts zurück. Auf der Weltausstellung 1939 in New York beinhaltete das von General Motors finanzierte „Futura“, eine Modellstadt für die Welt von 1959/60, bereits funkgesteuerte elektrische Fahrzeuge und selbstfahrende Autos wurden in diesem Zusammenhang ebenfalls für 1960 prognostiziert (Geddes, 1940). In den

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

darauffolgenden Jahrzehnten versuchten zahlreiche überwiegend US-amerikanische Projekte eine Annäherung an fahrerlose Autos mittels in die Straße eingebetteter Signalgeber. In den 1980er Jahren rückten visuelle Systeme zur Fahrzeugsteuerung in den Vordergrund und die entsprechenden Prototypen kamen dem automatisierten Fahren erstaunlich nahe. Das bis heute größte europäische Forschungs- und Entwicklungsprojekt zum autonomen Fahren, das Projekt PROMETHEUS (Flegl & Goerich, 1995), startete beispielsweise 1987 und gipfelte 1995 in einer 1590 km langen hochautomatisierten Autobahnfahrt im regulären Verkehr von München nach Kopenhagen und zurück. Das allein mittels Bilderkennung und Mikroprozessoren gesteuerte Fahrzeug fuhr dabei zeitweise über 175 km/h schnell und der längste Streckenabschnitt ohne menschlichen Eingriff betrug 158 km (Durchschnitt: 9 km). Einen weiteren Meilenstein auf dem Weg zum automatisierten Fahren stellte die DARPA Grand Challenge 2005 dar. Dieser vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium gesponserte Wettbewerb bestand in einem Rennen zwischen autonomen Roboterfahrzeugen in der südwestamerikanischen Mojave-Wüste. Sieger des Wettbewerbs wurde ein Team der Universität Stanford. Ihr Fahrzeug „Stanley“ bewältigte den über 200 Kilometer langen Kurs in knapp sieben Stunden, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30.7 km/h entsprach (Thrun et al., 2006). Von der Serienreife waren solche und ähnliche, bis unter das Dach mit Rechnern und Kabeln beladene automatisierte Fahrzeuge freilich noch weit entfernt. Die beschriebenen Projekte dienten vielmehr dazu, unter Einsatz enormer technischer und finanzieller Ressourcen, in Pionierarbeit das technisch Machbare abzubilden und dessen Grenzen zu erweitern.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts verliehen der enorme Anstieg von Rechnerkapazitäten und die Fortschritte im Bereich der Radar- und Kamerasensorik dem automatisierten Fahren einen neuen Entwicklungsschub. Immer mehr private und öffentliche Forschungsinitiativen auf der ganzen Welt statteten Fahrzeuge mit moderner Sensorik aus und starteten Erprobungen auf Teststrecken und im realen Verkehr. Vorreiter in der Erprobung autonomer Fahrzeuge waren und sind die USA. Aber auch in Deutschland entstanden zahlreiche kleine und größere Forschungsarbeiten, unter anderem auf universitärer Ebene, bei Automobilherstellern sowie in einer Vielzahl von Kooperationen. Eine Wiedergabe dieser jüngeren Entwicklungen würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Stattdessen soll im folgenden Abschnitt kurz auf den jeweils aktuellen Stand der Entwicklungen der wichtigsten Akteure eingegangen werden.

1.2 Gesetzeslage zum autonomen Fahren und aktueller Stand der technischen Entwicklung

Bis 2017 war das autonome Fahren in Deutschland lediglich im Rahmen von Fahrtests auf einzelnen, dafür freigegebenen Autobahnabschnitten zulässig: Das internationale Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 schreibt vor, dass der Fahrzeugführer stets die Kontrolle über sein Fahrzeug oder seine

Zugtiere behalten können muss (United Nations, 1968). Eine wenn auch nur vorübergehende Abgabe der Fahrzeugkontrolle an ein technisches System schied damit aus.

Am 30. März 2017 wurde im Bundestag ein Gesetzentwurf zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes beschlossen, welcher das hochautomatisierte Fahren auf deutschen Straßen unter bestimmten Voraussetzungen ermöglicht (Bundestag, 2017, 30.03.). Demzufolge darf sich der Fahrzeugführer am Steuer eines entsprechend ausgestatteten Fahrzeugs während des Fahrens „mittels hoch- oder vollautomatisierter Fahrfunktionen [...] vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugsteuerung abwenden; dabei muss er derart wahrnehmungsbereit bleiben, dass er seiner Pflicht nach Absatz 2 jederzeit nachkommen kann“ (Bundestag, 2017, 29.03.). Laut Absatz 2 umfasst diese Pflicht die Übernahme der Fahrzeugkontrolle im Fall von Übernahmeaufforderungen durch das Fahrzeug oder anderen Fällen. Der Gesetzentwurf war und ist umstritten: Verbraucherschützer beklagen Rechtsunsicherheit bei Unfällen und die Vorratsspeicherung der Fahrzeugdaten (K. Müller, 2017). Dennoch öffnete Deutschland damit als erstes europäisches Land sein Straßenverkehrsgesetz für die bestimmungsgemäße Nutzung von L3-Systemen.

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, hatte sich die Entwicklung des automatisierten Fahrens in den vergangenen 15 Jahren in Folge technischer Fortschritte beschleunigt. Bis vor wenigen Jahren überboten sich einige Fahrzeughersteller, Zulieferer und IT-Konzerne gegenseitig mit ambitionierten Prognosen bzgl. Umfang und Serienreife ihrer Automationssysteme für den Massenmarkt. Nach Gulde (2021) wurde die Komplexität der erforderlichen Technik wohl unterschätzt, denn vor dem Hintergrund einstiger Visionen erscheinen die aktuellen Planungen führender Unternehmen eher konservativ. Dennoch scheint zumindest einem deutschen Hersteller ein Durchbruch gelungen zu sein.

- **Mercedes-Benz** hat als erster Autohersteller weltweit die Genehmigung für den Verkauf von L3-Fahrzeugen erhalten. Seit Mitte April 2022 ist in den Modellen EQS und S der sogenannte „Drive Pilot“ verfügbar, der unter einer Vielzahl von situativen Voraussetzungen das autonome Fahren im Stau auf der Autobahn bis 60 km/h ermöglicht. Hierbei folgt das Fahrzeug dem Vorfahrenden und Spurwechsel sind nicht möglich. Der Fahrer kann sich während der automatisierten Fahrt mit anderen Dingen beschäftigen, bei Unfällen haftet der Hersteller. Mercedes-Benz hofft darüber hinaus auf eine gesetzliche Freigabe eines Autobahnpiiloten bis 130 km/h mit Spurwechsel in den nächsten Jahren (Gulde, 2021).
- **BMW** wollte 2021 mit dem Modell iNext den Einstieg in das autonome Fahren machen. Auch ein Autobahnpiilot bis 130 km/h war angekündigt. Nach aktuellem Stand wird es allerdings im iX genannten Serienmodell nicht einmal einen mit der S-Klasse vergleichbaren Staupiloten geben. Einführungsstermine für hochautomatisierte Fahrzeuge werden bisher nicht genannt (Gulde, 2021).

- **VW/Audi** hatte bereits 2017 einen Staupiloten vorgestellt, welcher in der aktuellen A8-Baureihe zum Einsatz kommen sollte. Allerdings scheiterte das System zwischenzeitlich an der Typengenehmigung des Kraftfahrtbundesamtes. Zu einem möglichen Einführungszeitpunkt von hochautomatisierten Fahrzeugen für Privatkunden macht der Konzern aktuell keine Aussage (Gulde, 2021).
- Der Elektrosporthwagen-Hersteller **Tesla** stattet seine Fahrzeuge seit 2015 mit einer Kombination aus Abstandsregeltempomat und Spurhaltesystem aus und vermarktet dieses System als „Autopilot“, welches mehrmals überarbeitet wurde. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich hierbei aber bis heute um teilautomatisiertes Fahren, bei dem der Fahrer das Fahrzeug dauerhaft überwachen muss – eine Diskrepanz zwischen Benennung und Funktionsumfang, für die das Unternehmen immer wieder kritisiert wurde. Bereits für Ende 2017 hatte das Unternehmen vollautonome Fahrzeuge angekündigt (Golson & Bohn, 2016), konnte dieses Versprechen allerdings bis heute nicht einlösen (Synced, 2020).
- Das Google-Tochterunternehmen **Waymo** bewegt seit 2018 hochautomatisierte Taxis in der Innenstadt von Phoenix mit regulären Kunden an Bord, seit November 2019 als weltweit erster Dienstleister mit autonomen Fahrzeugen ohne Sicherheitsfahrer. Waymo gibt an, auf diese Weise bereits über 10 Millionen Testmeilen Erfahrung mit seinen Fahrzeugen gesammelt zu haben. Das Kundeninteresse hält sich jedoch in Grenzen und die Fahrzeuge werden zum Teil beschädigt oder deren Insassen angefeindet (Gulde, 2021).

1.3 Nutzen und Risiken

Mit dem automatisierten Fahren sind seit jeher gleichermaßen Hoffnungen wie Befürchtungen verbunden. Zu den erhofften positiven Effekten gehört allen voran eine Steigerung der Verkehrssicherheit. Häufig wird in diesem Zusammenhang angeführt, dass menschliches Versagen für einen Großteil der Unfälle verantwortlich sei. Auch wenn diese Argumentation oft in fragwürdiger Weise verwendet wird, um von Schwachstellen einer Mensch-Maschine-Schnittstelle abzulenken, ist sie für das hochautomatisierte Fahren dennoch zutreffend. Ein fehlerfrei funktionierendes automatisiertes Fahrsystem wäre frei von vielen typischen Einschränkungen der menschlichen Fahrtüchtigkeit wie z. B. Müdigkeit, Ablenkung, Substanzeinfluss oder krankheits- bzw. altersbedingten Fertigungsverlust. Nicht nur eine Kompensation menschlicher Limitationen sondern auch über deren Fähigkeiten deutlich hinausgehende Eigenschaften sind plausibel: Die Fähigkeit der Fahrzeuge zur sensorbasierten Vorausschau sowie die Nutzung von „Schwarmintelligenz“ durch permanenten Austausch von Verkehrsflussinformationen über weite Strecken hinweg mittels sogenannter „Backend-Server“ könnten viele Unfälle frühzeitig verhindern und den Verkehrsfluss nachhaltig verbessern. Die Entlastung des Fahrers von der Fahraufgabe würde zudem menschliche Ressourcen einsparen

(v. a. Zeit und Aufmerksamkeit), welche die Person am Steuer beispielsweise zur Erholung, Entspannung, Unterhaltung oder auch zum Arbeiten nutzen könnte. Neben diesen und weiteren möglichen Vorteilen automatisierter Fahrzeuge werden zu Recht auch etwaige Nachteile einer zunehmenden Fahrzeugautomatisierung diskutiert. Anfällige Personen können während der Ausübung fahrfremder Tätigkeiten in automatisierten Fahrzeugen Reiseübelkeit entwickeln (Diels & Bos, 2016). Ebenso steht die Befürchtung im Raum, Fahrer könnten durch die zunehmende Übernahme wichtiger Fahrfunktionen durch das Fahrzeug auf lange Sicht Fertigkeiten verlernen und in den Situationen schlechter fahren, in denen keine Automation zur Verfügung steht. Ein weiterer Anstieg des ohnehin hohen Verkehrsaufkommens durch Entlastung des Fahrers am Steuer und die damit gestiegene Attraktivität des Individualverkehrs ist ebenfalls denkbar, z. B. über eine Zunahme von Berufspendlern. Am meisten Beachtung verdienen in der aktuellen Debatte jedoch Sicherheitsbedenken. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit hochautomatisiertem Fahren nach Stufe 3 der Nomenklatur der Bundesanstalt für Straßenwesen oder SAE Level 3² (eine genauere Abgrenzung der Stufen des automatisierten Fahrens bietet Abschnitt 2.1). Die Besonderheit dieser Automationsstufe besteht darin, dass es sich dabei – zugespitzt formuliert – um manuelles Fahren „auf Abruf“ handelt. So darf einerseits der Fahrer zwar die Kontrolle über sein Fahrzeug zeitweise vollständig abgeben, sich anderen Tätigkeiten widmen und muss das aktive System nicht mehr dauerhaft überwachen. Andererseits muss er laut SAE-Definition jederzeit in der Lage sein, die Kontrolle über sein Fahrzeug innerhalb eines angemessenen Zeitraumes wieder zu erlangen, sofern das Fahrzeug ihn dazu auffordert. Schlafen am Steuer von L3-Fahrzeugen steht dabei gar nicht zur Debatte - schon die Beförderung wacher Fahrer wirft zahlreiche Fragen auf. Bereits vor vierzig Jahren stellte Lisanne Bainbridge in ihrem viel beachteten Artikel *Ironies of automation* heraus, dass das dauerhafte passive Überwachen von automatisierten Prozessen den menschlichen Nutzern automatisierter Systeme besonders schwerfällt und sich hieraus unter Umständen größere Gefahren ergeben können, als durch die Automatisierung vermieden werden (Bainbridge, 1983). Auch aus den bereits seit geraumer Zeit hochgradig automatisierten Bereichen Luftfahrt sowie Prozesskontrolle liegen Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Automation vor. Hier ist in erster Linie das Phänomen der „*out-of-the-loop unfamiliarity*“ zu nennen: Es beschreibt den Effekt, dass aus der Automatisierung heraus neue Probleme resultieren, welche die Leistung der menschlichen Systemüberwacher bei erforderlichen aktiven Eingriffen in die Systeme oder bei erforderlicher Übernahme der Systemkontrolle beeinträchtigen können (Wickens, 1995). Ursachen hierfür sind u. a. nachlassendes Situationsbewusstsein mangels aktiver Beteiligung an Prozessen (Endsley, 1987), Nachlässigkeiten aufgrund übersteigerten Automationsvertrauens (Parasuraman & Riley, 1997) sowie Fähigkeitsverluste aufgrund mangelnder Übung (Kessel & Wickens, 1982).

Die aus der Luftfahrt bekannte *out-of-the-loop*-Problematik ist mit der Einführung (teil)automatisierter Fahrfunktionen in Serienfahrzeugen heute wieder aktueller denn je. Mehrere tödliche Unfälle aus den USA

² Im Folgenden wird diese Automationsstufe kurz „L3“ genannt.

mit selbstfahrenden Autos des Herstellers Tesla in den vergangenen Jahren haben die öffentliche Skepsis gegenüber dem automatisierten Fahren geprägt. Dabei spielt es nur eine untergeordnete Rolle, dass es sich bei den betreffenden Fahrzeugen lediglich um *teil*automatisierte Fahrzeuge nach SAE Level 2 handelte, die der Fahrer definitionsgemäß permanent überwachen muss (siehe Abschnitt 2.1). Die Systeme wurden als „AutoPilot“ vermarktet und die Unfälle zogen Fragen bezüglich der Beherrschbarkeit entsprechender Systeme durch den Fahrer nach sich, welche uneingeschränkt auch L3-Fahrzeuge betreffen. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Überlegung, mit welchen Tätigkeiten sich Personen am Steuer hochautomatisierter Fahrzeuge vor dem Hintergrund ihrer „Bereitschaftspflicht“ zum manuellen Fahren befassen können und wie sich die Beschäftigung mit diesen fahrfremden Tätigkeiten auf ihre Fähigkeit auswirkt, im Ernstfall wieder selbst die Steuerung des Fahrzeugs übernehmen zu können. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Art und Weise, wie die Interaktion zwischen Mensch und Maschine in solchen Situationen am besten gestaltet sein sollte.

1.4 Aufbau und Ziele der vorliegenden Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist folgendermaßen gestaltet: Abschnitt 2 legt die theoretische Grundlage für die empirischen Studien. Dabei wird zunächst ein Einstieg zum hochautomatisierten Fahren in Abgrenzung zum voll- bzw. teilautomatisierten Fahren gegeben, mit besonderem Augenmerk auf die Anforderungen an den Fahrer. Es wird herausgearbeitet, dass es sich beim hochautomatisierten Fahren um eine Sequenz aus Fahrzeugführung und fahrfremden Tätigkeiten handelt und in Übernahmesituationen jeweils Aufgabenwechsel stattfinden. Anschließend werden dementsprechend die allgemeinspsychologischen Grundlagen von Aufgabenwechseln thematisiert. Die wichtigsten Forschungsparadigmen werden ebenso skizziert wie die zentralen Befunde zu den sogenannten Wechselkosten und deren Ursachen, welche häufig in bestimmten Aufgabenmerkmalen zu finden sind. Besonderes Augenmerk liegt dabei in auf der Verringerung dieser Wechselkosten. In Analogie zu den allgemeinspsychologischen Befunden werden in einem zweiten Schritt zentrale Merkmale fahrfremder Tätigkeiten in Übernahmesituationen vor dem Hintergrund entsprechender Literaturbefunde dargestellt. Ziel des Vorgehens ist es, Befunde aus der allgemeinspsychologischen Grundlagenforschung und der angewandten verkehrspsychologischen Forschung gleichermaßen in ein überzeugendes experimentelles Design zur Beantwortung der Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit zu überführen. In einem dritten Schritt werden adaptive Übernahmekonzepte anhand bestehender Literaturbefunde beleuchtet.

In Abschnitt 3 folgt der empirische Teil der Arbeit mit insgesamt 4 Simulatorstudien, welche zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen sollen:

- Durch welche übergeordneten Merkmale zeichnen sich fahrfremde Tätigkeiten im automatisierten Fahren aus?
- Welchen Einfluss besitzen diese Merkmale auf die Fahrerleistungen in Übernahmesituationen?
- Welches Potenzial besitzen solche Übernahmeaufforderungen, welche adaptiv sind im Hinblick auf die gefundenen Merkmale?

Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend zusammengefasst und diskutiert. Den Abschluss der Arbeit bildet ein Ausblick auf mögliche Anwendungen der Befunde in der Praxis.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Hochautomatisiertes Fahren

Das hochautomatisierte Fahren ist gegenwärtig regelmäßiger Bestandteil des wissenschaftlichen wie gesellschaftlichen Diskurses. Neben Fahrzeugherstellern und Zulieferern beschäftigt sich seit geraumer Zeit auch der Gesetzgeber mit dieser neuen Form des Autofahrens. Durch die Berichterstattung in den Medien ist das „Fahren der Zukunft“ mit allen damit verbundenen Hoffnungen und Ängsten seit Längerem in der Vorstellungswelt der Fahrzeugkunden angekommen. Wie bereits in Abschnitt 1.1 angedeutet, handelt es sich bei der Fahrzeugautomation um ein Kontinuum zwischen konventionellen manuellen Fahrzeugen der Vergangenheit und vollautonom fahrenden Fahrzeugen der Zukunft. Die automobilen Gegenwart ist zwischen diesen beiden Punkten angesiedelt: Viele fortschrittliche Technologien sind bereits in Serienfahrzeugen angekommen und ermöglichen automatisiertes Fahren in bestimmten Grenzen. Von einer Serienreife automatisierter Fahrzeuge kann jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht die Rede sein, wie der aktuelle Stand der Entwicklung (vgl. Abschnitt 1.2) zeigt. Dies liegt wie bereits beschrieben u. a. daran, dass die Technologie an den Übergangspunkten zwischen verschiedenen Stufen der Fahrzeugautomation hohe Anforderungen an Fahrzeug und Fahrer stellt. Der folgende Abschnitt soll diese rekapitulieren und damit Orientierung liefern.

2.1.1 Beschreibung und Begriffsklärung

Abbildung 1 veranschaulicht die Stufen des automatisierten Fahrens und bildet damit auch das vorangehend beschriebene Kontinuum zwischen manuellem und vollautonomem Fahren ab. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit hochautomatisiertem Fahren nach Stufe 3 der Nomenklatur des Verbands der Automobilindustrie oder SAE Level 3 (SAE, 2018). Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer die Fahrzeug-

kontrolle über einen längeren Zeitraum an das Fahrzeug abgeben kann, sofern ihm das Fahrzeug diese Möglichkeit einräumt. Während eines hochautomatisierten Fahrabschnitts kann und darf der Fahrer anderen Tätigkeiten nachgehen (sog. fahrfremden Tätigkeiten, im Folgenden kurz FFT genannt) und muss sein Fahrzeug nicht überwachen. Er hat jedoch als Rückfallebene jederzeit für die Übernahme der Fahrzeugkontrolle innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens zur Verfügung zu stehen. Wie bereits erwähnt, ist Schlafen am Steuer hiervon nicht abgedeckt. Das hochautomatisierte Fahren befindet sich aktuell noch in der Erprobung und ist ausschließlich für Autobahnen vorgesehen. Die Möglichkeit zur automatisierten Fahrt wird dem Fahrer üblicherweise vom Fahrzeug mittels visueller Anzeige angeboten und dieser kann das System in der Regel durch Knopfdruck aktivieren. Das Fahrzeug nimmt während eines hochautomatisierten Fahrabschnitts neben der Quer- und Längsführung bei Bedarf auch Notfalleingriffe wie z. B. Notbremsungen vor. Einen essenziellen Bestandteil von L3-Systemen bilden Übernahmeaufforderungen an den Fahrer in solchen Fällen, in denen das System an seine Grenzen stößt. Typische Übernahmesituationen sind z. B. fehlende Spurmarkierungen, nicht kartierte Baustellen oder plötzliche Hindernisse auf der Fahrbahn. Für die Kommunikation an den Fahrer kommen in den meisten Erprobungssystemen multimodale Warnungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Einsatz, z. B. visuell-akustische Warnungen. Es besteht weitgehend Konsens, dass das Reaktionszeitfenster für den Fahrer nicht zu kurz sein darf. Wie viel Zeit der Fahrer mindestens benötigt, um die Fahrzeugkontrolle sicher zu übernehmen, ist dagegen umstritten und hängt von vielen Variablen ab. Eine gute Übersicht geben Zhang, De Winter, Varotto, Happee und Martens (2019). Die Obergrenze des Zeitrahmens hingegen richtet sich bei unerwarteten Ereignissen auf der Straße nach den technischen Möglichkeiten zur Vorausschau durch die Fahrzeugsensorik. Aktuell ist hierbei von einem Zeitbereich bis maximal 10 s auszugehen. Einen großen Anteil der Systemgrenzen bilden Situationen, die durch Kartenmaterial, verkehrstechnische Dokumentation oder Stauinformationen bereits bei Fahrtantritt bekannt sind, wie z. B. Autobahnausfahrten oder Baustellen.

Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens

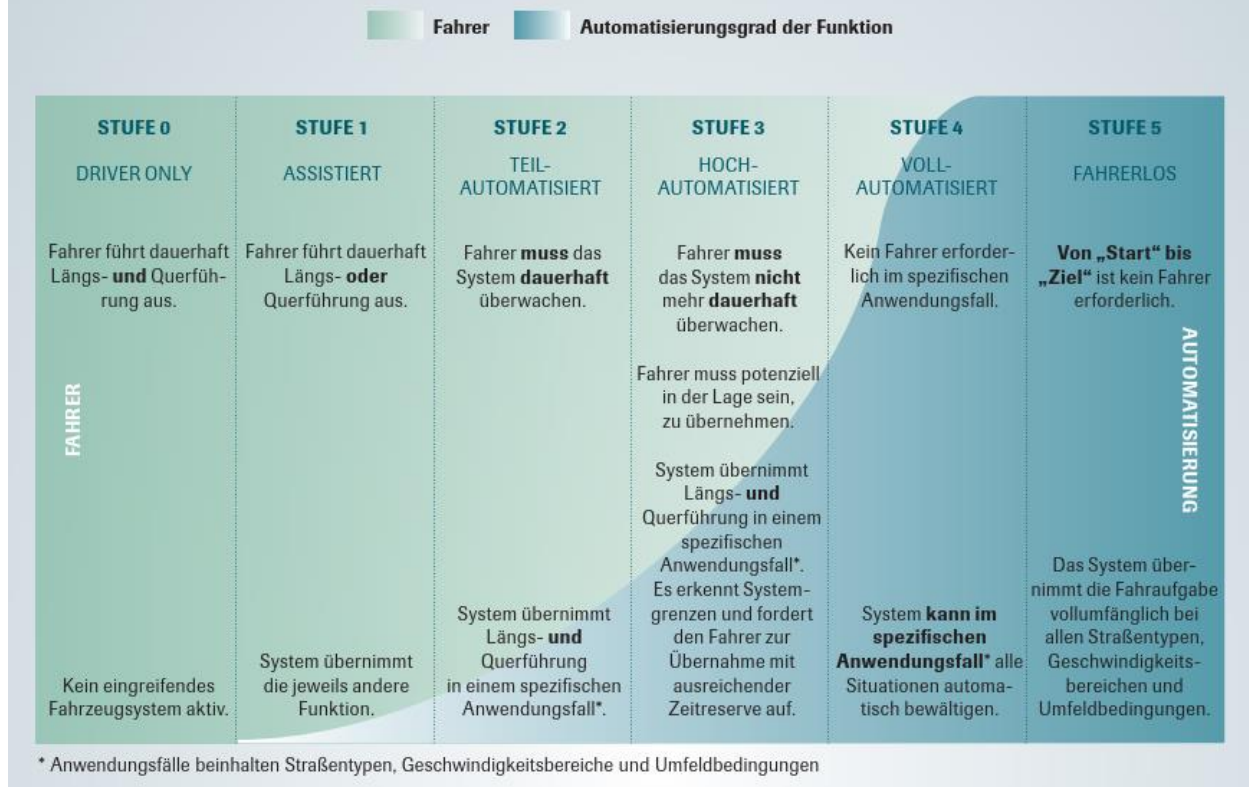


Abbildung 1. Stufen des automatisierten Fahrens. Quelle: VDA (2015)

2.1.2 Abgrenzung zu teil- und vollautomatisiertem Fahren

In teilautomatisierten Fahrzeugen nach SAE Level 2 muss der Fahrer das Verkehrsgeschehen dauerhaft überwachen und je nach Fahrzeughersteller wird er bei freihändiger Fahrt nach wenigen Sekunden bis mehreren Minuten vom Fahrzeug aufgefordert, das Lenkrad mit den Händen zu greifen.

Im vollautomatisierten Fahrzeugen nach SAE Level 4 ist der Fahrer innerhalb der Verfügbarkeit des vollautomatischen Fahrmodus überhaupt nicht mehr für die Fahrzeugführung zuständig – auch nicht als Rückfallebene. Er muss unter keinen Umständen in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen und dürfte hier sogar schlafen. Bei einem möglichen Ende der L4-Verfügbarkeit stellt das System bei ausbleibender Fahrerreaktion einen sicheren Fahrzeugzustand her, z. B. durch selbstständiges Ansteuern eines Parkplatzes. Ambitionierte Konzepte in dieser Automationsstufe erproben sogar ein vorübergehendes Verschwinden des Lenkrades während der L4-Fahrt (Wörle et al., 2020).

Das hochautomatisierte Fahren gemäß SAE Level 3 als Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist zwischen diesen beiden Stufen angesiedelt. Den Fahrer trifft zwar keine Pflicht zur Überwachung des Fahrzeugs mehr

(in Abgrenzung zu Level 2), er stellt aber (in Abgrenzung zu Level 4) nach wie vor die Rückfallebene an Systemgrenzen dar (vgl. Abbildung 1).

2.2 L3-Übernahmesituationen

2.2.1 Relevanz in Forschung und Testpraxis

Es wird davon ausgegangen, dass Übernahmesituationen im L3-Fahren hauptsächlich an den Funktionsgrenzen des automatisierten Fahrsystems auftreten werden. Im Rahmen einer umfangreichen Literaturlanalyse im Auftrag der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), einer Abteilung des Verbandes der Automobilindustrie (VDA), wurden rund 380 experimentellen Untersuchungen zu L3-Übernahmesituationen identifiziert (Schömig, Befelein, Wiedemann & Neukum, 2020). Dabei wurden folgende Szenarien besonders häufig betrachtet:

- **Ca. 50 % der Studien: Plötzliches Hindernis auf der eigenen Fahrspur**, z. B. durch einen Unfall, ein Pannenfahrzeug, verlorene Ladung etc. (z. B. Feldhütter, Kroll & Bengler, 2018; A. L. Müller, Fernandes-Estrela, Hetfleisch, Zecha & Abendroth, 2021; Wandtner, 2018; Wiedemann et al., 2018).
- **Ca. 20 % der Studien: Baustellenbereich**, meist in Verbindung mit geänderten Spurmarkierungen (z. B. Körber, Prash & Bengler, 2017; Petermeijer, Doubek & De Winter; Roche, Somieski & Brandenburg, 2018; Wörle, Metz & Baumann, 2021).
- **Ca. 15 % der Studien: Fehlende Spurmarkierungen** (z. B. Damböck, Farid, Tönert & Bengler, 2012; Fu et al., 2020; Molnar, 2017; Zeeb, Buchner & Schrauf, 2016).
- **Ca. 15 % der Studien: Systemabwurf ohne erkennbaren Grund** (z. B. Berghöfer, Purucker, Naujoks, Wiedemann & Marberger, 2018; Eriksson & Stanton, 2016; Schneider, 2017; Schömig, Wiedemann, et al., 2020).

Aus der Praxis mit L3-Testfahrzeugen liegen Erkenntnisse zur Häufigkeit von Systemabwürfen vor. In Kalifornien sind Hersteller automatisierter Fahrzeuge, welche diese im Rahmen bestimmter Programme testen, verpflichtet, jährliche Berichte darüber abzuliefern, wie häufig ihre Fahrzeuge die Kontrolle an den Fahrer zurückgeben. Seit ein paar Jahren veröffentlicht das Department of Motion Vehicles in Kalifornien (DMV) die entsprechenden Berichte (DMV, 2021).

Tabelle 1 zeigt die durchschnittlich gefahrenen Testkilometer pro Systemabwurf in Abhängigkeit von Berichtsjahr und Hersteller (Herger, 2019, 2020, 2021). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollen hier nur die jeweils Erst- und Letztplatzierten sowie zum Vergleich die deutschen Hersteller BMW und Mercedes-Benz angegeben werden.

Jahr	Anzahl der testenden und berichtenden Unternehmen	Anzahl Testfahrzeuge	Maximale berichtete Distanz pro Systemabwurf in km	Minimale berichtete Distanz pro Systemabwurf in km	Berichtete Distanz deutscher Autohersteller	
					BMW	Mercedes-Benz
2018	28	467	17847 (Waymo)	0.6 (Uber)	7.3	2.3
2019	36	676	29042 (Baidu)	0.64 (Box Bot)	4.3	11
2020	29	n.a.	47911 (Waymo)	0.8 (Valeo)	65	41

Tabelle 1. Durchschnittlich gefahrene Testkilometer pro Systemabwurf in Abhängigkeit von Berichtsjahr und Hersteller. Quelle: DMV (2021), adaptiert nach Herger (2019, 2020, 2021).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Resultate der beteiligten Unternehmen sehr heterogen sind, auch wenn der allgemeine Trend in Richtung seltenerer Systemabwürfe weist. Die Resultate der Hersteller BMW und Mercedes-Benz sowie die aktuellen Entwicklungsstände zum automatisierten Fahren (vgl. Abschnitt 1.2) unterstreichen die Relevanz von Übernahmesituationen. Sie geben Anlass zu einer intensiven wissenschaftlichen Beschäftigung mit diesem Bestandteil hochautomatisierten Fahrens nach SAE L3.

2.2.2 Anforderungen an den Fahrer

Übernahmesituationen im L3-Fahren stellen bestimmte Anforderungen an den Fahrer, welche in dem in Abbildung 2 dargestellten Übernahmeprozess nach Naujoks, Befein, Wiedemann und Neukum (2017) zusammengefasst sind. Der Prozess geht von spezifischen Phasen und dazugehörigen Fahreranforderungen aus.

In **Phase 1** („HAF engaged“) ist das L3-System noch vollumfänglich aktiv. Möglicherweise wird dem Fahrer an dieser Stelle bereits das Herannahen einer Übernahmesituation visuell angekündigt. In dieser Phase wird vom Fahrer lediglich eine grundsätzliche Verfügbarkeit (z. B. Wachzustand) zur Übernahme der manuellen Fahrzeugführung gefordert. Diese kann z. B. durch Unterforderung (*passive* Müdigkeit) oder Überbeanspruchung (aktive Müdigkeit, May & Baldwin, 2009) beeinträchtigt sein.

In **Phase 2** („HAF degraded“) ist das L3-System immer noch aktiv, jedoch wurde bereits eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer ausgegeben. In jener Phase muss der Fahrer in der Lage sein, diese wahrzunehmen, zu verarbeiten und zu interpretieren. Negativ auswirken können sich hier fahrfremde Tätigkeiten, welche dieselben Wahrnehmungskanäle adressieren wie die Übernahmeaufforderung, z. B. das Betrachten eines Videos bei visuell-akustischer Aufforderung zur Übernahme.

In **Phase 3** („HAF disengagement“) wird vom Fahrer eine Beendigung bzw. Unterbrechung fahrfremder Tätigkeiten und eine Kontaktaufnahme mit den Stellteilen (Bremse und Lenkrad) gefordert. Besonders herausfordernd dürften hierbei Tätigkeiten sein, deren Unterbrechung aus einer Abfolge von Handlungsschritten besteht oder bei denen Gegenstände für die Übernahme an fixen Positionen im Fahrzeug positioniert werden müssen (z. B. die Bedienung mobiler Endgeräte oder Essen/Trinken).

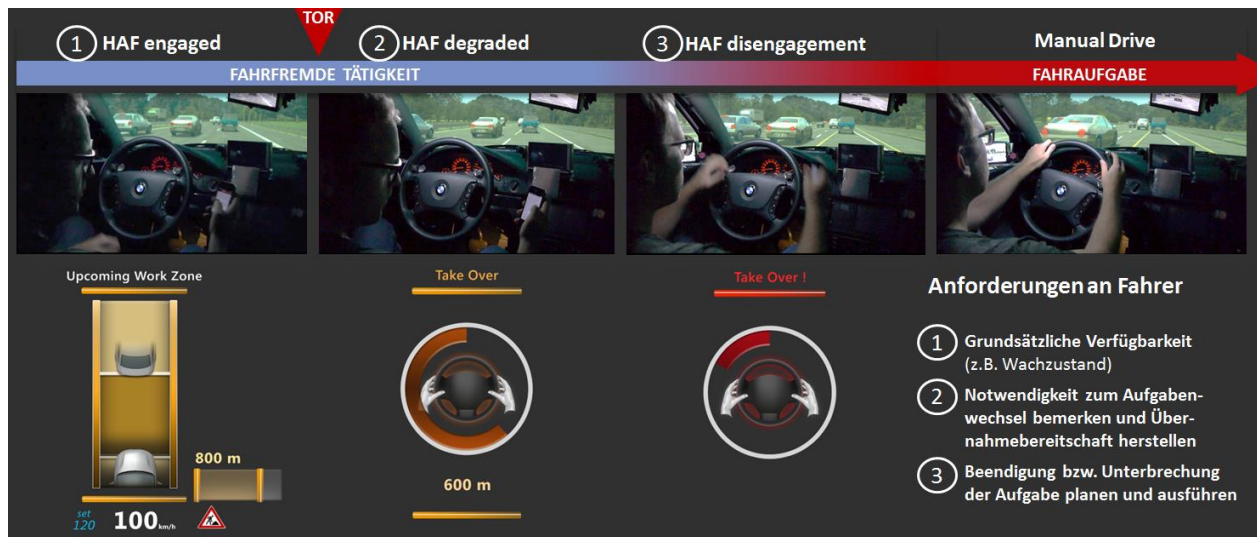


Abbildung 2. Übernahmeprozess beim hochautomatisierten Fahren. Von links nach rechts werden vier Phasen des Übernahmeprozesses angenommen: (1) hochautomatisierte Fahrt („HAF engaged“), (2) Annäherung an Systemgrenze („HAF degraded“), (3) Übernahme der manuellen Fahrzeugführung („HAF disengagement“) und manuelle Fahrt („manual drive“). TOR = Take-Over-Request (Übernahmeaufforderung). Quelle: Naujoks et al. (2017).

2.2.3 Allgemeinpsychologische Grundlagen: Aufgabenwechsel

Im manuellen, assistierten oder teilautomatisierten Fahren (SAE Level 0-2) ist die Fahrzeugführung stets die Hauptaufgabe des Fahrers (SAE, 2018). Während der Fahrt ausgeführte Tätigkeiten finden hier immer parallel zur Fahrzeugführung statt und werden deshalb auch als „Nebentätigkeiten“ bezeichnet. Aus psychologischer Perspektive handelt es sich hierbei um geteilte Aufmerksamkeit zwischen Fahraufgabe und Nebenaufgabe. In L3 ist während hochautomatisierter Fahrabschnitte weder die Fahrzeugführung noch deren Überwachung Aufgabe des Fahrers. An die Stelle einer Parallelität von Fahraufgabe und Nebenaufgabe tritt in L3 somit eine Aufgabensequenz, in der sich Abschnitte der manuellen Fahrzeugführung als Hauptaufgabe mit Phasen abwechseln, in denen anderen Tätigkeiten nachgegangen werden kann. Letztere sind hier nicht mehr der Fahraufgabe untergeordnet und werden folglich „fahrfremde Tätigkeiten“ (kurz „FFT“) genannt. Vom psychologischen Standpunkt aus betrachtet handelt es sich hierbei um Aufgabenwechsel –

ein Thema, zu dem aus der Grundlagenforschung zahlreiche Erkenntnisse vorliegen. Im folgenden Abschnitt sollen die für die vorliegende Arbeit relevanten Befunde vorgestellt und vor dem Hintergrund des automatisierten Fahrens diskutiert werden.

2.2.3.1 Gängige Forschungsparadigmen und Aufgaben

Die psychologischen Prozesse im Rahmen von Aufgabenwechseln sind seit langer Zeit Gegenstand allgemeinspsychologischer Studien. Gemeinsam ist dabei vielen Untersuchungen, dass Probanden zunächst mindestens zwei (einfache) Aufgaben einüben, welche sich auf bestimmte Stimuli (auch Zielreize genannt) beziehen. Die Aufgaben in den entsprechenden Experimenten bestehen für die Teilnehmer üblicherweise im Kategorisieren dieser Stimuli. Die Zielreize sind häufig Zahlen (z. B. gerade, ungerade, teilbar durch X), Buchstaben (z. B. Vokal oder Konsonant) und Wörter (z. B. Gegenstand oder Lebewesen). Oft sind die Zielreize für verschiedene Aufgaben von gleicher Art (z. B. Zahlen als Zielreize, welche ja nach Aufgabe entweder nach Größe oder nach Teilbarkeit kategorisiert werden müssen). Auch die erforderlichen Reaktionen auf die Zielreize sind in verschiedenen Aufgaben oft gleich, z. B. soll die Taste A gedrückt werden, sofern ein Zielreiz größer als X oder gerade ist und die Taste B, sofern ein Zielreiz kleiner als X oder ungerade ist. Als relativ einfache Aufgaben gelten im Allgemeinen solche, deren Reiz-Reaktions-Muster stark gelernt sind wie beispielsweise das Benennen von Objekten oder das Lesen von Wörtern. Schwieriger sind dagegen zufällige (z. B. rote Schrift – Taste A, blaue Schrift – Taste B) oder gar überlappende Reiz-Reaktions-Muster (z. B. die Schriftfarbe eines Wortes benennen vs. das Wort selbst nennen; Stroop, 1935).

Die dabei ablaufende Kette von Verarbeitungsprozessen wird Aufgaben-Set genannt. Sie besteht üblicherweise aus der Kategorisierung dargebotener Reize bezüglich relevanter Merkmale, der Zuordnung des Ergebnisses dieser Kategorisierung zu einer Reaktionskategorie auf Basis eines Entscheidungskriteriums und schließlich der Ausführung der dazugehörigen motorischen Reaktion. Die Übernahme eines Aufgabensets besteht darin, jene Elemente einer solchen Prozesskette auszuwählen, zu verknüpfen und zu konfigurieren, welche eine Aufgabe erfüllen. Bei Aufgabenwechseln muss das Aufgaben-Set neu konfiguriert werden (Rogers & Monsell, 1995).

Die verschiedenen Forschungsparadigmen zu Aufgabenwechseln unterscheiden sich u. a. darin, wann und wie der Proband das Wissen über die auszuführenden Aufgaben erhält. In zwei prominenten Paradigmen zu Aufgabenwechseln ist die jeweils nächste Aufgabe für den Probanden von vornherein abzusehen.

- Im *Paradigma von Jersild* (1927) werden Aufgabenblöcke, in denen immer dieselbe Aufgabe ausgeführt werden muss (z. B. „AAAAAA“ oder „BBBBBB“), mit Blöcken verglichen, in denen die Aufgaben sich nach dem Schema „ABABAB“ abwechseln. Der Proband benötigt während eines Aufgabenblocks somit keine weiteren Hinweise auf die auszuführenden Aufgaben. Der zeitliche

Mehraufwand durch den Wechsel der Aufgaben (die sog. „Wechselkosten“) wird durch die Reaktionszeitdifferenz zwischen Wechselblöcken und Wiederholungsblöcken berechnet (Allport, Styles & Hsieh, 1994; Fagot, 1995; Jersild, 1927; Spector & Biederman, 1976). Es ist umstritten, inwiefern diese Methode tatsächlich nur Wechselkosten abbildet. Die verlängerten Reaktionszeiten in gemischten Blöcken gegenüber einfachen Aufgabenblöcken könnte u. a. auch damit zusammenhängen, dass in ersteren immer zwei Aufgabensets im Arbeitsgedächtnis aufrecht erhalten werden müssen oder allgemein mit höherer Aufgabenschwierigkeit und damit verbunden höherem Arousal (Bundesen, 2007; Fagot, 1995; Rogers & Monsell, 1995).

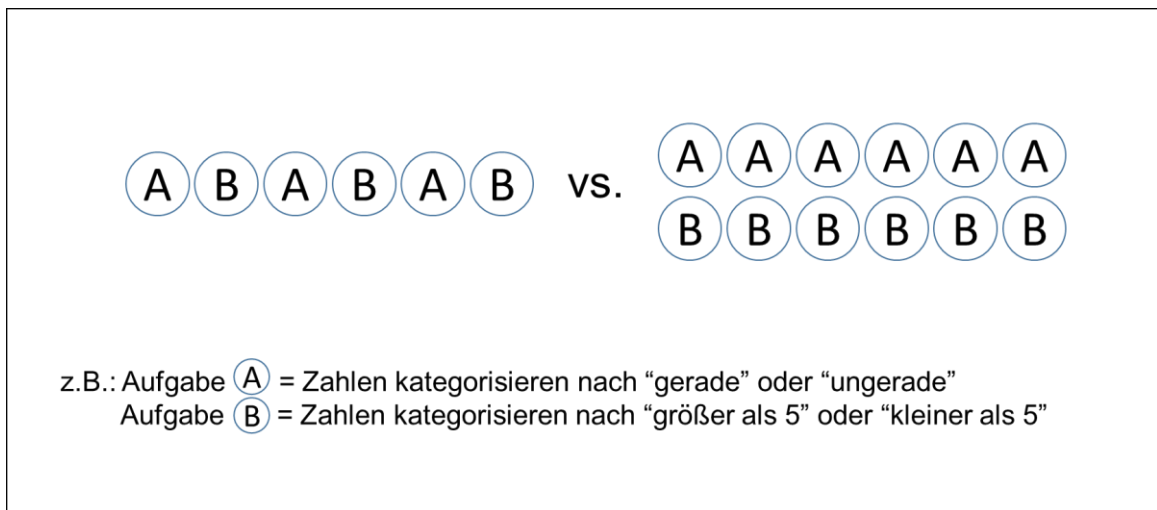


Abbildung 3. Typisches Aufgabenschema beim Vergleich von gemischten Aufgabenblöcken mit einfachen Aufgabenblöcken (adaptiert nach Kiesel et al., 2010).

- Das *alternating-runs Paradigma* (Rogers & Monsell, 1995) versucht die genannten Schwierigkeiten zu überwinden, indem innerhalb eines Aufgabenblocks die Aufgabe für den Probanden vorhersehbar nach einer festen Anzahl von Stimuli wechselt (z. B. „AABBAA“). Dadurch lassen sich innerhalb eines Blocks Wechseldurchgänge (z. B. Leistung in Aufgabe B, wenn zuvor A bearbeitet wurde) und Wiederholungsdurchgänge (z. B. Leistung in Aufgabe B, wenn zuvor ebenfalls B bearbeitet wurde) miteinander vergleichen, ohne dass von insgesamt unterschiedlichen Aufgabenanforderungen zwischen Blöcken ausgegangen werden muss. Die Wechselkosten werden somit gewissermaßen „lokal“ in den einzelnen Blöcken und nicht „global“ über verschiedene Blöcke hinweg gemessen (Rogers & Monsell, 1995).

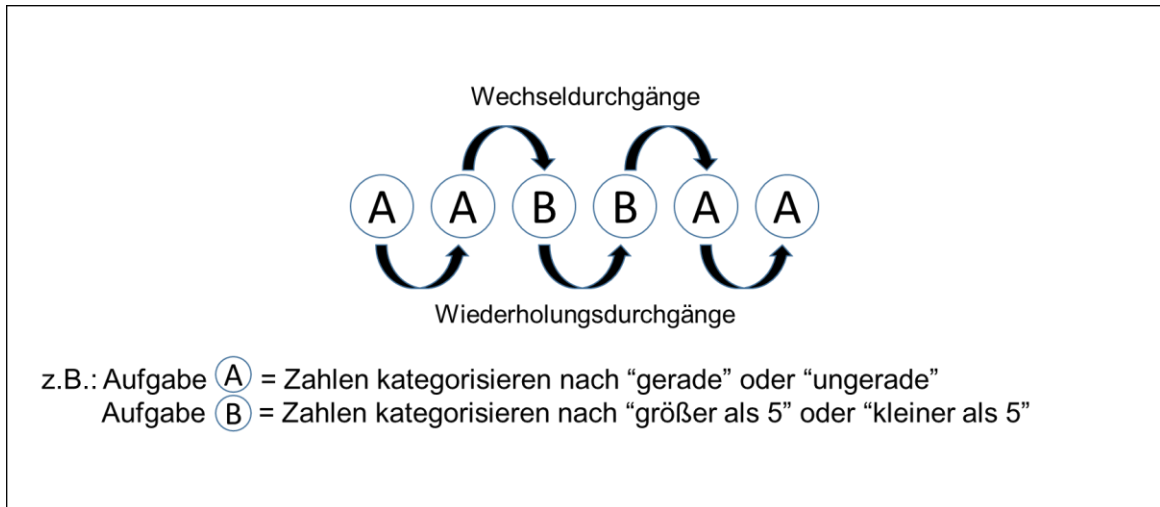


Abbildung 4. Typisches Aufgabenschema beim *alternating-runs* Paradigma (adaptiert nach Kiesel et al., 2010).

In beiden geschilderten Paradigmen lässt sich die Vorbereitungszeit des Probanden erhöhen, indem man die Latenz (Zeitspanne) zwischen seiner Reaktion und dem nächsten Stimulus vergrößert. Da der Proband die nächste Aufgabenregel ja bereits kennt, kann er sich gewissermaßen innerlich darauf vorbereiten. In dieser Vorbereitungszeit kann jedoch auch das vorangegangene Aufgaben-Set verblassen. Beide Effekte lassen sich hier nicht klar voneinander trennen.

Etwas anders verhält es sich bei Paradigmen, in denen die Aufgaben für den Probanden nicht vorhersehbar sind:

- Im **task-cueing Paradigma** ist die konkrete Aufgabe für den Probanden zunächst unvorhersehbar. Erst kurz vor oder zeitgleich mit der Darbietung des Stimulus wird der Proband durch Hinweisreize informiert, welche Aufgabe jeweils auszuführen ist. Die Bedeutung der Hinweisreize ist dem Probanden dabei bekannt. Durch dieses Vorgehen ist es möglich, die Vorbereitungszeit des Probanden (durch das Intervall zwischen Hinweisreiz und Stimulus) und das Verblassen des vorangegangenen Aufgaben-Sets voneinander getrennt zu variieren (Kiesel et al., 2010).

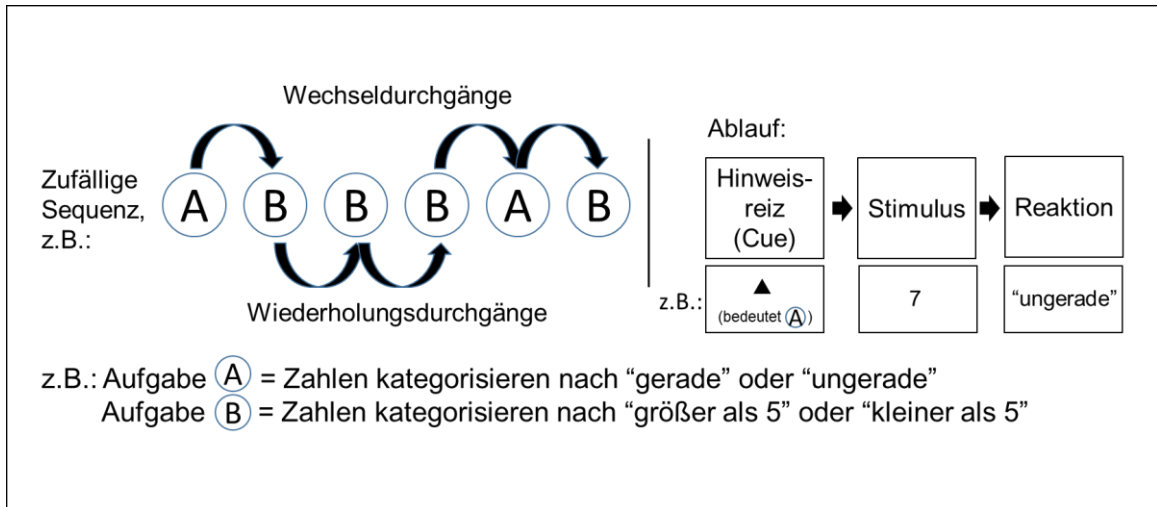


Abbildung 5. Typisches Aufgabenschema und Ablauf im *task-cueing* Paradigma (adaptiert nach Kiesel et al., 2010).

- In eine ähnliche Richtung geht das **Paradigma intermittierender Instruktion**. Dabei wird eine Reihe von Aufgabendurchgängen an unvorhersehbarer Stelle unterbrochen und dabei entweder ein Aufgabenwechsel oder ein Fortsetzen der vorangegangenen Aufgabe instruiert. Zur Messung der Wechselkosten wird die Wiederaufnahmeleistung in den neuen Aufgaben mit der Wiederaufnahmeleistung in den Fortsetzungsaufgaben verglichen. Auch die Kosten einer Unterbrechung bei Fortsetzung der vorangegangenen Aufgabe können damit gemessen werden (Kiesel et al., 2010).

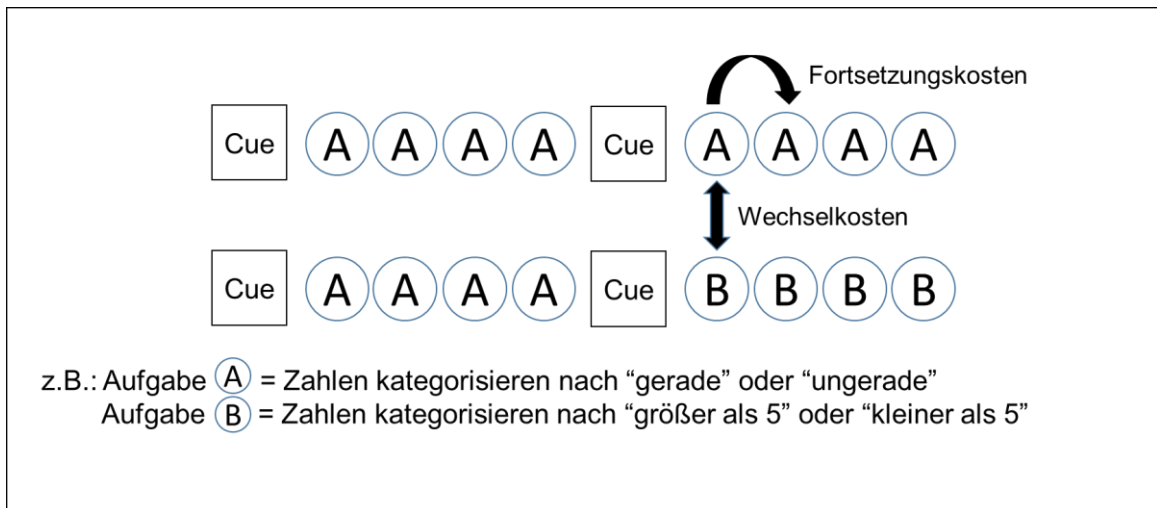


Abbildung 6. Typisches Aufgabenschema im *Paradigma intermittierender Instruktion* (adaptiert nach Kiesel et al., 2010).

2.2.3.2 Grundlegende Befunde

Im folgenden Abschnitt sollen diejenigen Befunde der allgemeinspsychologischen Forschung zu Aufgabenwechseln dargestellt werden, welche für die vorliegende Arbeit relevant sind.

Wechselkosten

Aufgabenwechsel gehen zuverlässig mit Kosten einher, welche sich in verlängerten Reaktionszeiten und erhöhten Fehlerraten bei der Aufgabenbearbeitung niederschlagen (Kiesel et al., 2010). Bereits in den Experimenten von Jersild (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) traten die sogenannten „Wechselkosten“ auf: Blöcke ohne Aufgabenwechsel benötigten weniger Bearbeitungszeit als Blöcke mit Aufgabenwechseln. Dieser grundlegende Befund konnte in den verschiedensten Untersuchungen repliziert werden (Cellier & Eyrolle, 1992; Yeung & Monsell, 2003a), auch wenn er nicht unter allen Bedingungen auftritt. In Laboruntersuchungen zu Aufgabenwechseln betragen Wechselkosten meist Bruchteile einer Sekunde. Außerhalb des Labors können sie auch größer ausfallen, wie Wickens, Dixon und Ambinder (2006) in Untersuchungen zur Überwachung unbemannter Flugobjekte feststellten. Wie bereits erwähnt, lassen sich Wechselkosten auch durch längere Vorbereitungsintervalle nicht vollständig beseitigen. Es verbleiben sogenannte residuale Wechselkosten. Ihr Fortbestehen konnte vielfach gezeigt werden, auch für längere Vorbereitungsintervalle von bis zu 5 Sekunden (Allport et al., 1994; Fagot, 1995; Kimberg, Aguirre & D’Esposito, 2000; Meiran, 1996, 2000; Meiran, Chorev & Sapir, 2000; Rogers & Monsell, 1995; Rubinstein, Meyer & Evans, 2001; Sohn, Ursu, Anderson, Stenger & Carter, 2000; vgl. jedoch Verbruggen, Liefvooghe, Vandierendonck & Demanet, 2007). Für die vorliegende Arbeit sind vor allem residuale Wechselkosten relevant, da diese auch bei reichlich Vorbereitungszeit bestehen bleiben und da im Kontext des Autofahrens bei hohen Geschwindigkeiten Reaktionsverlangsamungen durch die währenddessen zurückgelegte Wegstrecke gravierende Folgen haben können.

In der Literatur haben sich im Wesentlichen zwei Erklärungsansätze für residuale Wechselkosten herausgebildet. Einerseits sehen mehrere Modelle die Entstehung residualer Wechselkosten in der Phase der Aufgabenvorbereitung verortet. Sogenannte **Zwei-Stufen-Modelle** teilen den Vorbereitungsprozess auf in eine erste Stufe, welche vor der Darbietung des Zielreizes stattfindet und eine zweite Stufe, welche erst nach Darbietung des Zielreizes ablaufen kann (Mayr & Kliegl, 2000; Meiran, 2000; Rogers & Monsell, 1995; Rubinstein et al., 2001). Somit können Aufgabenwechsel immer nur teilweise vorbereitet werden. Die vollständige Vorbereitung eines Aufgabenwechsels vor Darbietung des neuen Stimulus wird als strukturell unmöglich angesehen. Für die Erklärung von residualen Wechselkosten wird eine zweite Vorbereitungsstufe angenommen, welche erst nach Darbietung des Zielreizes starten kann. Eine etwas andere Perspektive eröffnen Modelle, in denen die Neukonfiguration des Aufgaben-Sets als zusammenhängenden Prozess betrachtet wird, welcher zwar im Rahmen der Aufgabenvorbereitung vor Darbietung des Stimulus stattfinden

kann, aber manchmal in diesem Zeitraum nicht funktioniert (De Jong, 2000; Logan & Bundesen, 2003; Mayr & Kliegl, 2000; Nieuwenhuis & Monsell, 2002; Sohn & Anderson, 2001). De Jong (2000) stellte die sogenannte *failure-to-engage*-Hypothese auf, um das Fortbestehen von residualen Wechselkosten trotz ausreichender Möglichkeit zur Aufgabenvorbereitung im Voraus zu erklären. Er betrachtet die Aufgabenvorbereitung als *Alles-oder-nichts*-Prozess. Es wird angenommen, dass Probanden bei ausreichender Zeitspanne zwischen Hinweisreiz und Stimulus zwar prinzipiell in der Lage sind, die neue Aufgabe vor Darbietung des Stimulus vollständig vorzubereiten, dies aber in einigen Durchgängen fehlschlägt. Die verminderte Leistung in Durchgängen mit Aufgabenwechseln trotz ausreichender Vorbereitungszeit spiegelt demzufolge eine Mischung aus vollständig vorbereiteten und unvorbereiteten Durchgängen wider.

Vorbereitungseffekte

Ein weiterer stabiler Effekt besteht darin, dass sich Wechselkosten verringern lassen, indem Probanden vor Stimulusdarbietung mehr Zeit gegeben wird, sich mental auf die kommende Aufgabe einzustellen. Voraussetzung für diese sog. Vorbereitungseffekte ist freilich, dass Probanden die kommende Aufgabe kennen. In Paradigmen mit vorhersehbaren Aufgabenwechseln (z. B. bei nach einem festen Muster abwechselnden Aufgaben im *Alternating-Runs* Paradigma) erfolgt die Vorbereitung entsprechend bereits direkt nach der Reaktion auf die vorangegangene Aufgabe. Hier kann die Vorbereitungszeit durch Verlängerung des Reaktion-Stimulus-Intervalls (RSI) vergrößert werden. Bei Wechseln zu unvorhersehbaren Aufgaben (z. B. *Task-Cueing* Paradigma) beginnt die Vorbereitung erst nach Darbietung des Hinweisreizes. Somit kann hier die Vorbereitungszeit durch Verlängerung des Hinweisreiz-Stimulus-Intervalls vergrößert werden. Belege für die günstigen Auswirkungen von verlängerten Vorbereitungsintervallen existieren sowohl für vorhersehbare als auch für unvorhersehbare Aufgabenwechsel (Hoffmann, Kiesel & Sebald, 2003; Kiesel & Hoffmann, 2004; Koch, 2001; Meiran, 1996; Meiran et al., 2000; Monsell, Sumner & Waters, 2003; Rogers & Monsell, 1995). Es wird davon ausgegangen, dass während der Vorbereitungsintervalle bereits im Voraus eine Neukonfigurierung des Aufgaben-Sets stattfindet und deshalb schneller und besser reagiert werden kann.

Interferenzen zwischen alter und neuer Aufgabe

Ein weiterer wichtiger Ansatz zur Erklärung von Wechselkosten sind Interferenzen. Dabei handelt es sich um Prozesse, welche die Leistung in der aktuellen Aufgabe verringern und ihren Ursprung entweder in der zuvor bearbeiteten Aufgabe oder in bevorstehenden Aufgaben haben. Interferenz-Ansätze sehen in Wechselkosten weniger die Dauer aktiver Kontrollprozesse (im Sinne einer Aufgaben-Set-Neukonfiguration), sondern Störeinflüsse aus vergangenen oder zukünftigen Aufgaben. Für den Kontext der vorliegenden Arbeit ist vor allem die sogenannte proaktive Interferenz von Belang. Entsprechende Ansätze gehen davon

aus, dass die Leistung bei Aufgabenwechseln deshalb beeinträchtigt ist, da das momentan relevante Aufgaben-Set in der vorangegangenen Aufgabe unterdrückt werden musste bzw. momentan irrelevante Aufgaben-Sets unterdrückt werden müssen, die zuvor relevant waren (Allport et al., 1994; Allport & Wylie, 1999; Wylie & Allport, 2000). Die Interferenz besteht hierbei in miteinander konkurrierenden Reiz-Reaktions-Mustern für ein und denselben Stimulus, welche das Fällen einer korrekten Antwortentscheidung durch den Probanden verzögern. Dieses Nachwirken von Einflüssen aus vorangegangenen Aufgaben wird von den Autoren auch „Aufgabenträgheit“ (*task-set inertia*) genannt. Mehrere Befunde sprechen dafür, dass bei Aufgabenwechseln das jeweils vorherige Aufgaben-Set noch nachwirkt. An erster Stelle sind hier Befunde zur **Asymmetrie von Wechselkosten** zu nennen. In vielen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Wechselkosten zwischen zwei verschiedenen Aufgaben in beide Richtungen häufig unterschiedlich stark ausgeprägt sind (Allport et al., 1994; Meuter & Allport, 1999; Monsell, Yeung & Azuma, 2000; Yeung & Monsell, 2003a, 2003b). Es zeigte sich insbesondere, dass Wechsel von der schwierigeren der beiden Aufgaben zur leichteren deutlich mehr Wechselkosten verursacht als umgekehrt. In einer Studie von Allport et al. (1994) wurden Probanden beispielsweise Begriffe als Stimuli dargeboten und die beiden Aufgaben bestanden darin, entweder die Schriftfarbe oder den Begriff zu nennen. Zwar benötigte die Benennung der Farbe generell mehr Zeit als die Nennung des Begriffs, aber die Wechselkosten waren höher beim Wechsel hin zum Begriff (der einfacheren Aufgabe) als beim Wechsel hin zur Farbe. Ein ähnliches Muster konnten Meuter und Allport (1999) für den Wechsel von der Muttersprache zu einer Fremdsprache et vice versa beim Vorlesen dargebotener Zahlen nachweisen. Asymmetrische Wechselkosten sind nicht auf Settings mit zwei unterschiedlichen Aufgaben beschränkt, sondern treten auch bei drei oder mehr Aufgaben auf: Mayr und Keele (2000) konnten beim Vergleich von n-2 Aufgabenwiederholungen (ABA...) und n-2 Aufgabenwechseln (CBA...) zeigen, dass die Leistung der Probanden in n-2 Wiederholungs-Blöcken beeinträchtigt ist gegenüber n-2 Wechselblöcken. Diese und ähnliche Befunde zur Asymmetrie von Wechselkosten sind zunächst überraschend, da der Wechsel zu einfacheren Aufgaben doch eigentlich besonders leicht gehen müsste. Sie lassen sich aber dahingehend erklären, dass gerade für die Unterdrückung von besonders einfachen Aufgabensets viele Ressourcen mobilisiert werden müssen und dass sich entsprechend verlangsamte Reaktionen ergeben, wenn dieses Aufgaben-Set später wieder an der Reihe ist. Der Effekt ist aber nicht von langer Dauer: Unabhängig von der Vorbereitungszeit kann eine Vergrößerung der Zeitspanne nach der Aufgabenbearbeitung die Leistung in der darauffolgenden Aufgabe wieder steigern (Meiran et al., 2000; Ruthruff, Remington & Johnston, 2001). Vorangegangene Aufgaben-Sets scheinen also eine Zeit lang nachzuwirken und mit wachsendem zeitlichen Abstand wieder zu verblassen.

Frühe Vorbereitungs-Ansätze versuchten, sämtliche Kosten von Aufgabenwechseln mit der Neukonfiguration des Aufgaben-Sets zu erklären (Rogers & Monsell, 1995). Andere Autoren konzentrierten sich auf

Interferenzen und begründeten sämtliche Wechselkosten mit Aufgaben-Set-Trägheit (Allport et al., 1994). Neuere Hybrid-Ansätze gehen davon aus, dass beide Prozesse bei Aufgabenwechseln zusammenwirken.

2.2.3.3 Übertragbarkeit von grundlagenpsychologischen Erkenntnissen auf den Fahrzeugkontext

Der theoretische Teil dieser Arbeit speist sich aus zwei unterschiedlichen experimentellen Befundquellen: Aus allgemeinspsychologischen Befunden zu Aufgabenwechseln einerseits sowie aus Erkenntnissen der angewandten (verkehrspsychologischen) Forschung zu L3-Übernahmesituationen andererseits. Abbildung 7 stellt die wichtigsten Merkmale typischer Experimente zu Aufgabenwechseln in der Grundlagenforschung und zu L3-Übernahmesituationen aus der angewandten Forschung gegenüber.

Domäne	Prüfungsumgebung	Aufgabe des Probanden	Triggersignal	Vorhersehbarkeit der Aufgabe	Übliche Zeitspannen zw. Trigger und Reaktion
Aufgabenwechsel (Grundlagenforschung)	Labor	Meist Tastenbetätigungen in Abhängigkeit des Hinweisreizes	Hinweisreiz (Task-Cue)	Erst ab Darbietung des Hinweisreizes	Sekundenbruchteile
L3-Übernahmesituationen (Angewandte Forschung)	Fahrsimulator / Realfahrzeug	Übernahme der Fahrzeugkontrolle mittels Lenkrad/ Pedalen	Übernahmeaufforderung (TOR)	Von vornherein vorhersehbar, da immer ähnlich	Mehrere Sekunden

Abbildung 7. Vergleich der Merkmale typischer Experimente zu Aufgabenwechseln (Grundlagenforschung) und L3-Übernahmesituationen (angewandte Forschung).

An dieser Stelle soll vor dem Hintergrund der Verschiedenheit beider zugrunde liegender Forschungsfelder die Übertragbarkeit grundlagenpsychologischer Erkenntnisse auf die angewandte Forschung kurz diskutiert werden:

- Die allgemeinspsychologische Grundlagenforschung zu Aufgabenwechseln ist stark quantitativ ausgerichtet. Große Probandenstichproben absolvieren in der Regel eine sehr hohe Anzahl von Testdurchgängen mit äußerst standardisierten Aufgaben, welche meist darin bestehen, dass auf visuelle und/oder akustische Triggersignale in einer ansonsten reizarmen Laborumgebung mittels Tastendrücken reagiert werden muss. Triggersignal und Probandenreaktion folgen einander in sehr kurzen Abständen und die auszuführende Aufgabe wird häufig erst sehr kurzfristig durch das Triggersignal spezifiziert. Unterschiede zwischen Bedingungen (z. B. mit oder ohne Aufgabenwechsel) drücken sich in Zeitunterschieden von Sekundenbruchteilen aus, welche in den sehr großen erhobenen Datenmengen dennoch Signifikanz erreichen können.

- Experimente der angewandten Forschung zu L3-Übernahmesituationen sind prinzipiell anders gestaltet. Im Fahrzeugkontext sind beispielsweise Reaktionszeitunterschiede zwischen verschiedenen Bedingungen (z. B. zwischen verschiedenen fahrfremden Tätigkeiten) meistens größer und haben auch erst ab einer gewissen Dauer praktische Relevanz. Um diese Unterschiede mit vertretbarem finanziellen und zeitlichen Aufwand abzubilden, genügen meist kleinere Stichproben und eine geringere Anzahl von Durchgängen. Die experimentelle Umgebung im Realverkehr oder im Fahr Simulator ist dabei deutlich komplexer. Als Triggersignal für den Wechsel von der FFT zur Fahraufgabe dient ein TOR, welcher in der Regel nur angibt, dass der Fahrer die Fahrzeugkontrolle übernehmen soll. Unterschiedliche Fahrerreaktionen in Abhängigkeit verschiedener TORs sind dagegen eher unüblich. Die geforderte Reaktion des Fahrers ist verglichen mit allgemeinspsychologischen Untersuchungen eher vielschichtig (Übernahme der Längs- und Querverführung des Fahrzeugs während der Fahrt, ggf. Ausweichmanöver etc.), allerdings sind die zur Verfügung stehenden Zeitbereiche von i. d. R. mehreren Sekunden auch entsprechend größer.

Die Unterschiede zwischen den beiden Forschungsgebieten sind also klar erkennbar und Transferstudien, welche die Grundlagenbefunde in die verkehrswissenschaftliche Praxis übertragen, liegen zum Thema dieser Arbeit nicht vor. Dennoch sollen die beschriebenen Befunde zu Wechselkosten, Vorbereitungseffekten und Interferenzen als Orientierungshilfe in die Konzeption des empirischen Teils der Arbeit einfließen.

2.2.3.4 Zwischenfazit

Die umfangreiche Literatur aus der psychologischen Grundlagenforschung zu Aufgabenwechseln liefert neben dem Nachweis hoher Kosten von Aufgabenwechseln bezüglich Reaktionszeit und Leistung auch zahlreiche Erklärungsansätze für deren Entstehung und zeigt auf, wie Wechselkosten verringert werden können. Zwar kann einerseits die Übertragung der unter Laborbedingungen gewonnenen Erkenntnisse auf den Kontext von Aufgabenwechseln beim automatisierten Fahren durch die grundlegende Verschiedenheit der Untersuchungen nicht uneingeschränkt erfolgen, andererseits sind die zugrunde liegenden psychologischen Phänomene auch dann ein nicht minder wichtiger Bestandteil menschlichen Verhaltens, wenn der Mensch am Steuer eines automatisierten Fahrzeugs sitzt und ihn dieses mit wechselnden Aufgabenstellungen konfrontiert. Ein zentraler Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist deshalb, die genannten Befunde als theoretischen Hintergrund in den experimentalpsychologischen Teil der vorliegenden Arbeit zu übertragen:

- **Wechselkosten:** Aufgabenwechsel haben ihren Preis. Sie verlängern fast immer Reaktionszeiten und erhöhen Fehlerraten bei der Aufgabenbearbeitung. Dies gilt sowohl unter Laborbedingungen als auch in natürlichen Umgebungen. Für die vorliegende Arbeit sind vor allem residuale Wechselkosten relevant, welche auch bei reichlich Vorbereitungszeit bestehen bleiben. Für den Kontext des automatisierten Fahrens ist zu erwarten, dass der Wechsel von fahrfremden Tätigkeiten hin zur

Fahraufgabe ebenfalls wertvolle Zeit kostet und sich diese Wechselkosten nur begrenzt reduzieren lassen.

- **Vorbereitungseffekte:** Die zur Verfügung stehende Zeitspanne vor einer erforderlichen Reaktion beeinflusst die mentale Vorbereitung auf die kommende Aufgabe und kann helfen, Wechselkosten zu verringern. Für eine erfolgreiche Vorbereitung muss der Proband die Aufgabe möglichst gut kennen, so kann er bei ausreichender Vorbereitungszeit schneller und besser reagieren. Dies lässt sich auch für den Kontext des automatisierten Fahrens annehmen: Übernahmeaufforderungen, welche frühzeitig erfolgen und dem Fahrer ausreichend Vorbereitungszeit geben, sollten die Sicherheit von Übernahmen erhöhen. Voraussetzung ist allerdings, dass sie den Fahrer klar über das von ihm geforderte Verhalten informieren.
- **Interferenzen:** Störeinflüsse aus vergangenen Aufgaben erhöhen Wechselkosten, indem momentan irrelevante Aufgaben-Sets unterdrückt werden müssen, die zuvor relevant waren. Dieses Nachwirken von Einflüssen aus vorangegangenen Aufgaben ist auch am Steuer eines automatisierten Fahrzeuges zu erwarten, insbesondere dann, wenn für die Übernahme der Fahraufgabe eine völlig anders geartete fahrfremde Tätigkeit unterbrochen und deren Aufgaben-Set unterdrückt werden muss.

Alle drei beschriebenen Phänomene bilden einen grundlagenpsychologischen Stand der Forschung und damit eine verlässliche empirische Basis für die Betrachtung aktueller, drängender Fragestellungen im Rahmen automatisierter Fahrzeuge. Die im vorangegangenen Teil ausführlich erläuterten Phänomene der Wechselkosten und Vorbereitungseffekte spielen eine wichtige Rolle sowohl bei der Konzeption als auch bei der Ergebnisinterpretation der empirischen Studien dieser Arbeit. Eine besondere Rolle kommt darin jedoch dem Phänomen der Aufgaben-Interferenzen zu. Schließlich sind sie der Ursprung aller Fragen aus der Rubrik „Was darf man am Steuer?“. Egal, ob in den vergangenen Jahrzehnten, als es sich um das Steuer manueller, assistierter und teilautomatisierter Fahrzeuge handelte oder in der Gegenwart und den kommenden Jahrzehnten, wenn es um das Steuer hoch- oder vollautomatisierter Fahrzeuge gehen wird: Die Interferenzen verschiedener Aufgaben am Steuer und die Grenzen des Fahrers bei deren Bewältigung waren in über 130 Jahren Automobilgeschichte unerschöpflicher Ursprung von Verkehrsunfällen, Forschungsarbeiten und gesetzlichen Regelungen und werden dies aller Wahrscheinlichkeit nach auch in absehbarer Zukunft sein. Entsprechend soll zum Abschluss des Theorieteils ein eigener Abschnitt den Merkmalen fahrfremder Tätigkeiten in L3-Übernahmesituationen gewidmet werden.

2.2.4 Merkmale fahrfremder Tätigkeiten in L3-Übernahmesituationen

Was der Fahrer am Steuer tun darf, unterliegt ebenso dem Zeitgeist wie die Bedürfnisse des Fahrers während der Fahrt. Ein gelegentlich diskutiertes Rauchverbot am Steuer hätte man sich vor fünfzig Jahren wohl noch ebenso wenig vorstellen können, wie das heute allgegenwärtige Bedürfnis vieler Fahrer, ihr Smartphone

auch während der Fahrt zu bedienen, ohne überhaupt telefonieren zu wollen. Die Fülle an denkbaren fahrfremden Tätigkeiten wächst immer weiter an und verändert sich gleichzeitig laufend. Um dieser Tatsache zu begegnen, ist es zielführend, derlei Aktivitäten am Steuer anhand klar definierter, übergeordneter Merkmale zu bewerten. Die folgende Literaturübersicht folgt diesem Prinzip, indem sie auf entsprechende Kategorisierungen in Veröffentlichungen zurückgreift. Sofern dies nicht möglich ist, wird die Zuordnung der Studien zu den Aufgabenmerkmalen selbst vorgenommen. Einen wichtigen Teil der vorliegenden Arbeit bildet die Untersuchung von Aufgabenmerkmalen, welche in der bisherigen Literatur noch wenig Beachtung gefunden haben.

Das hochautomatisierte Fahren nach SAE L3 war und ist ein Forschungsfeld von hohem wissenschaftlichen Interesse. In den vergangenen 10 Jahren sind mehr als 300 Publikationen zu Human Factors bezogenen Themen im L3-Fahren erschienen. Fast immer stand dabei die Fahrerleistung beim Wechsel von der FFT zur Fahraufgabe im Vordergrund. In drei Vierteln aller experimentellen L3-Studien mit Übernahmesituationen kommen fahrfremde Tätigkeiten zum Einsatz, einen Überblick hierzu geben Naujoks et al. (2017). Im folgenden Abschnitt sollen die wichtigsten Merkmale fahrfremder Tätigkeiten zusammengefasst und deren Umsetzung in der bisherigen Forschung skizziert werden. Aussagen über die Auswirkungen bestimmter Tätigkeitsmerkmale können leider nur begrenzt getroffen werden, da diese nur sehr selten innerhalb einer Studie systematisch variiert wurden.

2.2.4.1 Natürliche vs. artifizielle FFT

FFT in Studien zum hochautomatisierten Fahren variieren in ihrem Natürlichkeitsgrad. Damit ist die Wahrscheinlichkeit gemeint, mit der davon auszugehen ist, dass eine FFT von Fahrern auch in der Realität während hochautomatisierter Fahrabschnitte ausgeführt werden wird. Die Grenzen zwischen eher natürlichen und eher artifiziellen fahrfremden Tätigkeiten sind fließend.

Von den mehr als 300 erschienenen Publikationen zu Human Factors bezogenen Themen im L3-Fahren verwendete etwa ein Drittel artifizielle FFT (z. B. Radlmayr, Gold, Lorenz, Farid & Bengler, 2014; Wandtner, 2018; Wandtner, Schömig & Schmidt, 2018). Zu den klassischen artifiziellen FFT gehört z. B. der n-Back Task (z. B. Reimer, Mehler, Wang & Coughlin, 2012). Die Aufgabe des Probanden besteht in der verbalen Wiederholung einer Serie von akustisch dargebotenen Zahlen mit einem Versatz von n Schritten. Es handelt sich dabei um eine überwiegend kognitive Aufgabe ohne visuelle Komponente, bei der sich die Schwierigkeit sich mittels der Versatzgröße regulieren lässt. Eine weitere artifizielle FFT stellt der *Surrogate Reference Task* dar (SuRT, Mattes & Hallén, 2009). Hierbei sollen Probanden auf einem Display zwischen zahlreichen ablenkenden Reizen (kleine Kreise) vereinzelte Zielreize (größere Kreise) finden und auswählen. Es handelt sich dabei um eine visuell-manuelle Aufgabe, bei der sich die Schwierigkeit über den Größenunterschied zwischen ablenkenden Reizen und Zielreizen einstellen lässt.

Im überwiegenden Teil der Publikationen kamen eher natürliche FFT zum Einsatz (Befelein, Boschet & Neukum, 2018; A. L. Müller et al., 2021; Naujoks, Mai & Neukum, 2014; Zeeb, Buchner & Schrauf, 2015). Diese orientieren sich an alltäglichem menschlichen Verhalten im Fahrzeug und beinhalten z. B. die Suche nach Gegenständen oder die Nutzung von mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets zur Kommunikation und Unterhaltung. Empirische Befunde deuten darauf hin, dass Fahrer hochautomatisierter Fahrzeuge sich vorwiegend angenehmen Tätigkeiten widmen werden. Kyriakidis, Happee und De Winter (2015) führten mit 5000 Teilnehmern eine Onlinebefragung zum automatisierten Fahren durch, bei der Teilnehmer u. a. angeben sollten, welchen Tätigkeiten sie am Steuer hochautomatisierter Fahrzeuge nachgehen würden. Am häufigsten wurden hier das Hören von Musik, die Beschäftigung mit anderen Fahrzeuginsassen, die Betrachtung der Umgebung, der Verzehr von Speisen und Telefonieren genannt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt eine Simulatorstudie von Hecht, Feldhütter, Draeger und Bengler (2019). Hier durften Probanden für den Versuch wahlweise selbst Beschäftigungsmaterial mitbringen oder aus einer großen Palette an Unterhaltungsmedien auswählen (eingebautes Tablet mit Videos, Hörbücher, Spielen, Musik und Radio sowie zusätzlich Zeitschriften). Es konnte mehreren Beschäftigungen gleichzeitig nachgegangen werden. 75 % der Teilnehmer verwendeten ihr Smartphone für diverse Aktivitäten, 60 % lasen Bücher und Zeitschriften und 50 % verwendeten das eingebaute Tablet. Die Tätigkeiten wurden im Mittel nach etwa zwei Minuten automatisierter Fahrt aufgenommen. Es ist anzunehmen, dass diese Tätigkeiten für die Probanden einen höheren Anreiz bieten als die oben beschriebenen artifiziellen FFT.

2.2.4.2 Unterbrechungsaufwand

Die meisten alltagspsychologischen Experimente zu Aufgabenwechseln haben zum Ziel, Wechselkosten in Abhängigkeit verschiedener kognitiver Rahmenbedingungen möglichst standardisiert und frei von Störeinflüssen zu erfassen. Interferenzen spielen auch hier eine Rolle, jedoch hauptsächlich solche von kognitiver Natur wie z. B. das kognitive Nachwirken von Einflüssen aus vorangegangenen Aufgaben (*task-set inertia*, vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Dabei besteht die erforderliche Reaktion der Probanden üblicherweise aus einem einfachen Tastendruck, welchem vorangehend gar keine motorischen Tätigkeiten auszuführen sind. Wie auch immer geartete motorische Aufgaben, welche beim Aufgabenwechsel unterbrochen werden müssen, können in diesem Zusammenhang schon deshalb nicht eingesetzt werden, da die dafür erforderlichen Zeitbereiche jeglichen Rahmen sprengen und die interessierenden Verzögerungen durch kognitive Prozesse überlagern würden. Sie gelten deshalb in diesen Paradigmen als Störeinflüsse, die es zu vermeiden gilt. Bei Aufgabenwechseln in natürlicher Umgebung könnten jedoch gerade diese motorischen Störeinflüsse wichtige Determinanten der Wechselkosten sein, während kognitive Prozesse in ihrem anteiligen Beitrag zu Reaktionszeiten in den Hintergrund rücken. Viele der bereits angeklungenen Wunschbeschäftigungen von Menschen in automatisierten Fahrzeugen (Smartphone-Bedienung, Buchlektüre, Verzehr von Speisen) lassen einen relativ hohen Unterbrechungsaufwand erwarten.

Entsprechend versteht die vorliegende Arbeit unter dem Aufwand zur Unterbrechung einer FFT die Gesamtheit der motorischen Zwischenschritte, welche erforderlich sind, um eine aktuelle Beschäftigung zu unterbrechen und sich der Fahraufgabe zuwenden zu können.³ Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, gehören hierzu alle auszuführenden Handlungsschritte zwischen dem Empfang der Übernahmeaufforderung durch den Fahrer und dessen Kontaktaufnahme mit den Stellteilen (Bremse und Lenkrad). Beispiele sind das Beenden oder Pausieren einer FFT auf einem mobilen Endgerät oder die Positionierung von Gegenständen an einem bestimmten Ort (z. B. bei der Arbeit mit einem größeren Tablet oder dem Verzehr von Speisen). Es ist davon auszugehen, dass Unterbrechungsaufwände im realen Fahrgeschehen häufig aus einer Verbindung von Tätigkeitsmerkmalen (z. B. dem Warten eines Gesprächs- oder Chatpartners auf eine Reaktion des Fahrers am mobilen Endgerät bzw. vierteiligen, tropfenden oder flüssigen Objekten beim Verzehr von Speisen) und der Einstellung des Fahrers zu diesen Merkmalen entstehen (z. B. dem Anspruch, sein digitales Gegenüber im ersteren Fall nicht warten zu lassen, bzw. beim Verzehr von Speisen dem Bedürfnis nach Ordnung und Sauberkeit im Fahrzeug). Die Messung des Unterbrechungsaufwandes kann in Zeiteinheiten geschehen. Wie sich jedoch im empirischen Teil der Arbeit zeigen wird, hängt die Geschwindigkeit, mit der Fahrer Aufgaben unterbrechen, von weiteren Faktoren ab. Sinnvoller erscheint die Abgrenzung zwischen Aufgaben, welche eine hohe Anzahl an Unterbrechungsschritten erfordern, von solchen, deren Unterbrechung nur wenige oder gar keine Handlungsschritte erfordert. Die Manipulation des Unterbrechungsaufwandes im Experiment kann sowohl durch die Auswahl unterschiedlicher Tätigkeiten erfolgen, welche jeweils „von Natur aus“ einen anderen Unterbrechungsaufwand mit sich bringen. Um eine maximale Vergleichbarkeit von Bedingungen zu erhalten, können bei ein und derselben FFT unterschiedliche Unterbrechungsaufwände durch entsprechende Instruktion von Zwischenschritten hergestellt werden.

Die wenigen Arbeiten, die sich mit den Auswirkungen verschiedener Unterbrechungsaufwände beschäftigen, stammen aus dem verkehrspsychologischen Bereich:

- Befelein et al. (2018) untersuchten u. a. die Auswirkungen unterschiedlich aufwändig zu unterbrechender FFT in L3-Übernahmesituationen. Die Probanden spielten während der automatisierten Fahrt das Spiel Tetris® auf einem in der Hand gehaltenen Tablet. In Übernahme-situationen waren die Probanden je nach Bedingung angewiesen, das Tablet vor Übernahme der Fahrzeugkontrolle auf den Beifahrersitz zu legen (geringer Unterbrechungsaufwand) oder in einer Box auf dem Beifahrersitz sicher zu verstauen (hoher Unterbrechungsaufwand). Es zeigte sich ein starker Einfluss des Unterbrechungsaufwandes auf die Übernahmezeiten: Probanden in der Box-Bedingung über-

³ Studien die FFT mit motorischen Komponenten einsetzen, welche ohne weitere Schritte unterbrochen werden können, sind in Abschnitt 2.2.4.3 (Beteiligte Ressourcen) eingeordnet.

nahmen die Fahrzeugkontrolle im Mittel etwa 1.5 s später als in der Bedingung mit geringem Unterbrechungsaufwand – ein Unterschied, welcher in etwa 50 gefahrenen Autobahn-Metern entsprach.

- Naujoks, Purucker, Wiedemann und Marberger (2019) verglichen in einer Realfahrzeugstudie sehr unterschiedliche FFT in ihren Auswirkungen auf Übernahmeparameter. Die Probanden sollten je nach Bedingung ein Hörbuch hören, einen Gegenstand in einer Tasche hinter dem Beifahrersitz suchen, eine Zeitschrift lesen oder Tetris® auf einem Tablet spielen. Es zeigte sich, dass vor allem Aufgaben mit einer ausgeprägten motorischen Komponente wie das Halten von Gegenständen in der Hand oder die Notwendigkeit, den Körper von der Fahrszenerie abzuwenden, mit verlängerten Übernahmezeiten einhergehen.
- Vogelwohl, Vollrath, Kühn, Hummel und Gehlert (2016) verglichen, wie bereits beschrieben, das Tetris®-Spiel auf einem Tablet sowie die Lektüre von Zeitschriften mit einer reinen Überwachungstätigkeit des Fahrgeschehens. Die dabei gefundenen deutlich verlängerten Reaktionszeiten für Spiel und Lektüre gegenüber den Überwachungsbedingungen können ebenfalls als Hinweis auf einen Einfluss des motorischen Unterbrechungsaufwandes gelten. Die Autoren stellen fest: „Eine Nebenaufgabe auf einem Tablet-PC führt grundsätzlich zu einem späteren Abschalten der Automation, da der Tablet-PC zunächst aus der Hand gelegt wird bevor die Hände an das Lenkrad und die Füße zu den Pedalen gehen“ (S.121).

2.2.4.3 Weitere Einflussfaktoren

Zahlreiche Merkmale fahrfremder Tätigkeiten können die Übernahmeleistung des Fahrers zusätzlich beeinflussen. Im folgenden Abschnitt sollen davon jene kurz zusammengefasst werden, welche besonders mit Blick auf das natürliche Fahrgeschehen relevant sein können.

Beteiligte Ressourcen

Eine Rolle bei der Leistung in Aufgabenwechseln spielen die beteiligten Ressourcen. Einen Teil der Erkenntnisse liefern Forschungsarbeiten aus der Luftfahrt. Es zeigte sich u. a., dass Aufgaben mit Beteiligung des auditiven Arbeitsgedächtnisses (z. B. Funkansagen zuzuhören) resistenter gegenüber Unterbrechungen sind, da die Zuhörenden geneigt sind, keine Informationen zu verpassen (Latorella, 1996; Wickens & Colcombe, 2007). Hierzu passt auch der Befund, dass auditive Kommunikationsaufgaben manche übergeordnete visuelle Aufgaben von Piloten besonders stark stören (Damos, 1997).

Im Rahmen der verkehrspsychologischen Forschung setzten mehrere experimentelle Studien fahrfremde Tätigkeiten unterschiedlicher Modalitäten ein und verglichen Übernahmeparameter. Meist wurden aller-

dings solche FFT gegenüber gestellt, die sich neben der Modalität auch noch in weiteren Merkmalen unterscheiden. Das bedeutet, dass Unterschiede z. B. in Übernahmezeiten nicht notwendigerweise auf den Faktor Modalität zurückzuführen sein müssen, sondern auch andere Faktoren (Blickrichtung, kognitive Anforderungen etc.) die Ergebnisse konfundieren können. Im folgenden Abschnitt sollen nur solche Studien wiedergegeben werden, bei denen abgesehen von der Aufgabenmodalität eine hohe Vergleichbarkeit der Aufgaben angenommen werden kann. Ein häufiges Vorgehen in den Studien zur Übernahmeleistung ist die Darbietung einer FFT auf einem mobilen Endgerät (meist Tablet) und hierbei dann der direkte Vergleich zwischen der Bearbeitung der Aufgabe mit dem Gerät in den Händen oder in einer Halterung. Teilweise ist diese Trennung Fokus der Studien, teilweise wird der Vergleich im Rahmen anderer Fragestellungen „mit-erhoben“. In der vorliegenden Arbeit soll diese Aufteilung als eine Variation beteiligter Ressourcen betrachtet und deshalb an dieser Stelle referiert werden, auch wenn man teilweise argumentieren könnte, es handele sich dabei um unterschiedliche Bedienorte.

Vier einschlägige Arbeiten fanden keinen direkten Einfluss der Aufgabenmodalität auf Übernahmeparameter, wenn auch zwei der Studien Unterschiede im Blickverhalten nachweisen konnten. Aufgrund der Heterogenität der Untersuchungen ist eine übergreifende Einordnung dieses Befundes schwierig. Es ist jedoch denkbar, dass sich die FFT in den entsprechenden Studien zu wenig unterscheiden haben um unterschiedliche Effekte hervorzurufen.

- So verglichen Radlmayr, Fischer und Bengler (2019) den visuell-motorischen *Surrogate Reference Task* (SuRT, ISO, 2012), den kognitiven *n-Back Task* (Kirchner, 1958) sowie eine motorische Aufgabe in Übernahmesituationen und fanden keine signifikanten Unterschiede in der Übernahmereaktion. Allerdings zeigte sich, dass Probanden unter Bearbeitung der visuell-motorischen Aufgabe vor der Übernahmesituation im Mittel ca. 50 % weniger auf die Straße blickten.
- Ein ähnliches Bild zeigte sich bei Roche et al. (2018). Hier wurden eine visuelle und eine akustische Version eines Frage-Antwort-Spiels in Übernahmesituationen miteinander verglichen. Bei der visuellen Version wurden die Fragen auf einem Tablet dargeboten und der Proband musste die Antwort durch Tippen auswählen. Bei der akustischen Version las der Versuchsleiter über Lautsprecher die Fragen und Antwortalternativen vor und der Proband antwortete mündlich. Zwar zeigten sich auch hier keine Unterschiede in der Übernahmezeit zwischen den beiden Varianten. Allerdings blickten auch in dieser Studie visuell mit dem Spiel beschäftigte Probanden vor und nach Ausgabe der Übernahmeaufforderung seltener auf die Straße als Probanden mit akustischer Ablenkung durch den Versuchsleiter.

- Schartmüller, Weigl, Wintersberger, Riener und Steinhauser (2019) verwendeten eine Textverständnisaufgabe, welche den Probanden entweder auf einem konventionellen *Head-Up-Display*⁴ dargeboten oder unter Verwendung eines *text-to-speech* Programms elektronisch vorgelesen wurde. In Übernahmesituationen zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Übernahmeleistung zwischen den beiden Varianten.
- Bei Gold, Lorenz, Damböck und Bengler (2013) sowie Gold, Damböck, Lorenz und Bengler (2013) wurde der verwendete *Surrogate Reference Task* (SURT) bei der Hälfte der Probanden auf einem handgehaltenen Tablet und bei der anderen Hälfte der Probanden in der Mittelkonsole dargeboten. Die Trennung ergab in beiden Fällen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Übernahmeparametern.

Der überwiegende Teil der Arbeiten konnte hingegen Einflüsse der Aufgabenmodalität in der Übernahmesituation nachweisen:

- Diederichs et al. (2015) verglichen zwei unterschiedliche Varianten einer Leseaufgabe: Die Probanden lasen einen Text entweder auf einem Smartphone (scrollen im Text geschah mit den gebräuchlichen Wischbewegungen) oder im Cluster-Display (scrollen im Text mittels Lenkradtasten). Die Smartphone-Bedingung stellte dabei eine manuell, visuell und kognitiv beanspruchende Tätigkeit dar. In der Cluster-Bedingung wurde durch die ergonomischen Lenkradtasten und das in der Sichtlinie des Fahrers auf die Straße befindliche Display hingegen lediglich eine kognitive und marginal visuelle Ablenkung gesehen. In unvorhergesehenen Übernahmesituationen reagierten die Probanden mit Smartphone signifikant später als nicht abgelenkte Fahrer oder Fahrer mit der Cluster-Variante. Die letzten beiden Gruppen unterschieden sich hierbei nicht signifikant.
- Wandtner et al. (2018) nahmen als FFT die Reproduktion von Text und variierte hier sehr systematisch die Modalitäten „auditiv-vokal“ (Text nachsprechen), „visuell-vokal“ (Text vorlesen) und „visuell-manuell“ (Text abschreiben), wobei letztere Modalität nochmals unterteilt wurde in Abschreiben vom handgehaltenen Tablet und Abschreiben vom in einer Halterung fixierten Tablet. Es zeigte sich, dass in Übernahmesituationen die visuell-manuellen Aufgaben (insbesondere die handgehaltene Variante) mit den größten Reaktionszeiten einhergingen. Etwas schneller reagierten Probanden bei visuell-vokalen Aufgaben. Die kürzesten Reaktionszeiten wurden für die nicht abgelenkten oder mit einer auditiv-vokalen Aufgabe beschäftigten Probanden gemessen. Ein ähnliches Muster ergab sich für den minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug und auch im von den Probanden wahrgenommenen Risiko der Aufgaben schlug sich das Reaktionszeitmuster nieder: Aufgaben, welche mit

⁴ Hierbei handelt es sich um ein Display, welches (zumeist fahrrelevante) Informationen im Sichtbereich des Fahrers von innen auf die Windschutzscheibe projiziert.

größeren Reaktionszeiten einhergingen, wurden riskanter beurteilt als solche mit kürzeren Reaktionszeiten.

- Herzberger, Schwalm und Voß (2019) nutzten als fahrfremde Tätigkeiten ein Tetris®-Spiel auf einem Tablet (von den Autoren „visuell-haptisch“ genannt) und ein ebenfalls Tablet basiertes Skype-Telefonat ohne Videoübertragung (auditiv). Als Ergebnisse wurden erfolgreiche Fahrerübernahmen auf Basis objektiver Fahrsimulationsmessdaten berichtet. Die Gruppe „Tetris“ schnitt mit 53.8 % erfolgreichen Übernahmen schlechter ab als die Gruppe „Skype“ (69.2 %) und die Baseline ohne Ablenkung (78.6 %).
- Zhang, Wilschut, Willemsen und Martens (2019) verglichen in einer LKW-Simulatorstudie mit LKW-Fahrern Übernahmesituationen, bei denen die Fahrer vor einer Übernahme im Platooning-Szenario entweder ein Tablet verwendet oder die Augen geschlossen hatten. Beide Bedingungen verzögerten die Übernahme gegenüber aufmerksamen Fahrern insgesamt in ähnlichem Maße. Eine genauere Analyse ergab, dass die Verzögerung bei Fahrern mit Tablet Aufgabe vorwiegend durch das Beiseitelegen des Geräts zustande kam, während bei Fahrern mit geschlossenen Augen die Erfassung der Situation als auch das Ergreifen des Lenkrades gleichermaßen zur Verlangsamung beitrugen.
- Zeeb, Härtel, Buchner und Schrauf (2017) setzten identische Tablet Aufgaben (Texte lesen) sowohl mit in der Hand gehaltenem Tablet als auch mit in einer Halterung fixiertem Tablet ein. Der erhöhte manuelle Aufwand in der handgehaltenen Bedingung ging mit deutlich verzögerten Übernahmereaktionen und schlechterer Übernahmequalität einher.
- Othersen, Petermann-Stock, Schömig, Neukum und Fuest (2017) verglichen unterschiedliche Varianten einer Tablet basierten Quizaufgabe in Übernahmesituationen: Eine Hälfte der Probanden hielt das Tablet dabei in der Hand, bei der anderen Hälfte war das Tablet in der Mittelkonsole befestigt. Es zeigte sich, dass letztere Gruppe im Mittel signifikant früher in die Spiegel blickte, das Lenkrad ergriff und zu lenken begann (Ausweichszenario).

Komplexität

Auch die Komplexität einer Aufgabe kann eine Rolle bei der Leistung in Aufgabenwechseln spielen. Im Kontext des hochautomatisierten Fahrens setzten mehrere Untersuchungen unterschiedlich komplexe fahrfremde Tätigkeiten ein. Nur wenige Studien unternahmen einen systematischen Vergleich verschiedener Komplexitäten bei ansonsten vergleichbaren Aufgaben. Keine der Studien fand einen relevanten Einfluss auf Übernahmeparameter:

- Bueno et al. (2016) verwendeten eine FFT, bei der Probanden den korrekten Oberbegriff für drei Bilder finden mussten, welche jeweils eine Gemeinsamkeit hatten. Dieser Begriff musste auf einer Tastatur eingegeben werden. Die Aufgabenkomplexität wurde in erster Linie durch die Schwierigkeit variiert, den Oberbegriff abzuleiten. Die Studie fand keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Aufgabenkomplexität und Übernahmeparametern.
- Zu einem ähnlichen Ergebnis kam die bereits erwähnte Arbeit von Zeeb et al. (2017). Die beschriebene Leseaufgabe wurde dazu in schlichte Lektüre ohne weitere Vorgaben und Korrekturlesen (Identifikation von Rechtschreibfehlern) unterteilt. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen den beiden Varianten hinsichtlich der Übernahmeleistung.
- Wandtner (2018) verglichen ihre auditiv-vokale (Text nachsprechen), visuell-vokale (Text vorlesen) und visuell-manuelle (Text abschreiben) Aufgabe zusätzlich mit einer besonders anspruchsvollen visuell-manuellen Aufgabe. Für letztere Bedingung wurde die visuell-manuelle Aufgabe so abgewandelt, dass Probanden das jeweilige Wort alphabetisiert (d. h. mit nach Alphabet sortierten Buchstaben) eintippen sollten. Auch hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten hinsichtlich der Übernahmeparameter, auch wenn Probanden in der anspruchsvolleren Aufgabenvariante tendenziell später bremsten.
- Borojeni, Weber, Heuten und Boll (2018) gaben ihren Probanden eine standardisierte kognitive Aufgabe, bei der sie unzusammenhängende Sätze lesen und entscheiden mussten, ob diese semantisch Sinn ergeben (von der Malsburg, 2015). Nach jedem Satz wurde ein Wort dargeboten, das sich die Probanden merken sollten. Die Komplexität der Aufgabe wurde dadurch variiert, dass die memorierten Wörter nach drei Sätzen (drei Wörter) oder nach fünf Sätzen (fünf Wörter) in der richtigen Reihenfolge eingegeben werden mussten. Auch in dieser Studie zeigte sich in Übernahmesituationen kein Zusammenhang zwischen Aufgabenkomplexität und Reaktionszeiten oder Fahrleistungen.
- Bei Schartmüller, Riener, Wintersberger und Frison (2018) bestand die Aufgabe der Probanden im Abtippen von Sätzen mit einer Tastatur. Die Sätze entstammten dem CEFR (*Common European Framework of Reference for Languages: learning, teaching, assessment*, 2001), einem Rahmenwerk zur Erfassung der Fremdsprachenkompetenz. Die Komplexität der Aufgabe wurde über unterschiedlich schwierige Texte variiert, welche entsprechend verschiedener Kompetenzstufen des CEFR ausgewählt wurden. Die Variation der Textschwierigkeit hatte keinen Einfluss auf die Übernahmeleistung.

Ort der Aufgabenbearbeitung

Auch die unterschiedliche räumliche Orientierung zwischen zwei Aufgaben kann eine Rolle bei der Leistung in Aufgabenwechseln spielen. Im Fahrzeugkontext ist ein breites Spektrum an möglichen Orten für die Ausführung von fahrfremden Tätigkeiten denkbar. So könnte unter Realbedingungen der Fahrer im hochautomatisierten Fahrzeug z. B. etwas im Fußraum, zwischen den Sitzen oder auf der Rückbank suchen. Auch die direkte Beschäftigung mit anderen Fahrzeuginsassen kann eine Orientierung weg von der Straße bedingen, z. B. in Richtung Beifahrer- oder Rücksitz. Tätigkeiten mit mobilen Endgeräten wie Smartphone, Tablet oder PC können z. B. auf dem Schoß, in einer Halterung in der Mittelkonsole, auf der Mittelarmlehne oder auf dem Beifahrersitz ausgeführt werden. Ähnliches gilt natürlich für den Verzehr von Speisen oder Getränken.

Studien, welche ein und dieselbe Tablet basierte Aufgabe sowohl in den Händen als auch in einer Halterung bearbeiten ließen, wurden bereits im Abschnitt „beteiligte Ressourcen“ berichtet. Zum Zeitpunkt der Verfassung vorliegender Arbeit ist keine Publikation bekannt, bei der der Bedienort der FFT in einem weiter gefassten Spektrum variiert wurde.

2.2.4.4 Zwischenfazit

Durch die Vielzahl einschlägiger Publikationen liegen mittlerweile zahlreiche Befunde zu Merkmalen fahrfremder Tätigkeiten in L3-Übernahmesituationen vor. Im Folgenden sollen die Erkenntnisse zusammengefasst werden:

- **Natürliche vs. artifizielle FFT:** Studien, welche die Auswirkungen artifizieller und natürlicher FFT auf Übernahmeleistungen miteinander vergleichen, sind zum derzeitigen Zeitpunkt nicht verfügbar. Die Entscheidung in der vorliegenden Arbeit fällt jedoch klar zugunsten natürlicher FFT. Die meisten artifiziellen Aufgaben bieten gegenüber eher natürlichen Aufgaben zwar den Vorteil, dass sie sehr standardisiert ablaufen und die Sicherstellung von identischen Ablenkungsbedingungen zwischen verschiedenen Probanden zum Zeitpunkt von Übernahmeaufforderungen relativ einfach ist. Die Kehrseite artifizieller FFT ist jedoch ihr unnatürlicher, monotoner Charakter und die damit verbundene Herausforderung, Probanden durch externe Anreize dennoch zu einer intensiven Beschäftigung anzuregen. Hier ist mit hohem Aufwand bestenfalls extrinsische Motivation zu erreichen. Intrinsische Motivation, d. h. ein hoher Anreiz zur Bearbeitung der Aufgaben um ihrer selbst willen, kann nur schwer hergestellt werden. Letzteres sollte jedoch für eine valide Untersuchung der in der Realität zu erwartenden Ablenkungszustände Ziel sein. Die vorliegende Arbeit wird deshalb ihren Ausgangspunkt bei intrinsisch motivierenden, natürlichen FFT nehmen und diese schrittweise anpassen und variieren.

- **Unterbrechungsaufwand:** Eine zentrale Annahme der vorliegenden Arbeit ist, dass die im realen L3-Fahrgeschehen zu erwartenden FFT u. a. stark in ihrer Unterbrechbarkeit variieren und dass dies in der Forschung zum automatisierten Fahren deutlich mehr Berücksichtigung finden sollte als bisher. Die wenigen Publikationen, welche den Einflussfaktor Unterbrechungsaufwand der FFT untersuchten, sprechen für einen starken Einfluss dieses Merkmals. Im Folgenden sollen hierzu weitere Erkenntnisse geliefert werden.
- **Tätigkeitsanreiz:** Studien, welche isoliert die Auswirkungen unterschiedlich hoher Tätigkeitsanreize auf Übernahmeleistungen im hochautomatisierten Fahren untersuchen, sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht vorhanden. Mehrere Arbeiten geben zwar Hinweise darauf, dass der Anreiz einer FFT eine relevante Variable darstellen könnte. Allerdings werden hier meist völlig unterschiedliche Aufgaben miteinander verglichen, welche sich gleich in einer Vielzahl von Merkmalen unterscheiden und so die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Die vorliegende Arbeit geht davon aus, dass der Anreiz einer fahrfremden Tätigkeit eine wesentliche Bedeutung im L3-Fahrgeschehen innehaben wird und soll einen Beitrag zu deren Erforschung leisten.

2.2.5 Adaptive Transitionskonzepte im L3-Fahren

Der vorangegangene Abschnitt hat aufgezeigt, dass es eine große Rolle spielen kann, womit sich der Fahrer im Moment der Übernahmeaufforderung beschäftigt. Aber auch die Art und Weise, wie der Mensch am Steuer eines hochautomatisierten Fahrzeugs zur Übernahme der Fahrzeugkontrolle aufgefordert wird sowie der Zeitpunkt dieser Aufforderung, sind wichtige Kenngrößen in Übernahme-situationen. Besonders adaptive Transitionskonzepte, welche mehrere Rahmenbedingungen in das Timing und die Gestaltung von Übernahmeaufforderungen mit einbeziehen, sind in diesem Zusammenhang vielversprechend. Sie bilden die zweite Säule der vorliegenden Arbeit. In diesem Abschnitt werden adaptive Transitionskonzepte in Fahrzeugen zunächst allgemein und anschließend im Kontext des automatisierten Fahrens erläutert und die dafür wesentlichen Befunde wiedergegeben. Abschließend wird kurz auf allgemeinspsychologische Befunde zu Aufgabenwechsel-Paradigmen eingegangen, welche auch für adaptive Transitionen im Fahrzeugkontext relevant sein könnten.

2.2.5.1 Adaptive Systeme im Fahrzeug

Adaptation im weitesten Sinne bedeutet die Anpassung eines Systems oder Organismus an bestimmte Bedingungen. Im Fahrzeugkontext richten entsprechende Systeme ihr Verhalten oder ihre Kommunikation mit dem Fahrer an bestimmten situativen Rahmenbedingungen aus. In neueren Fahrzeugen haben viele adaptive Konzepte bereits einen festen Platz. Ein prominentes Beispiel bildet der mittlerweile weitverbreitete sog. Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC). Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des konventionellen Geschwindigkeitsreglers, bei der die vom Fahrer einstellbare Zielgeschwindigkeit

des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit von etwaigen Vorderfahrzeugen und einem einstellbaren Mindestabstand zu diesen Fahrzeugen erreicht oder vorübergehend unterschritten wird. Adaptive Warnkonzepte existieren ebenfalls vielfach in Serie. Ein neueres Beispiel bilden Müdigkeitswarner, welche aufgrund unterschiedlicher Parameter einen müden Fahrer erkennen sollen und ihn ggf. zu einer Fahrtunterbrechung anregen. Das L3-Fahren stellt gewissermaßen selbst ein adaptives System dar – schließlich soll die Aktivierung von L3-Systemen nur unter bestimmten Bedingungen überhaupt möglich sein (Autobahnfahrt, funktionierende Spurerkennung) und der Fahrer, wie bereits erörtert, im Bedarfsfall jederzeit die Kontrolle übernehmen können. Die Konditionalität eines solchen Systems steckt bereits in dessen gebräuchlicher englischsprachiger Bezeichnung *conditionally automated driving*.

2.2.5.2 Adaptivität im Rahmen von L3-Übernahmeaufforderungen

Aufforderungen an den Fahrer an den Grenzen der L3-Automation stellen einen wichtigen Anwendungsfall adaptiver Konzepte dar. Sehr stark in der Literatur vertreten sind die in den vorangegangenen Abschnitten häufig zitierten Übernahmeaufforderungen (z. B. Befeilin et al., 2018; Radlmayr et al., 2014; Zeeb et al., 2015). Einen selteneren Fall bilden z. B. Systeme, die den Fahrer bei Systemunsicherheiten auffordern, das System dauerhaft zu überwachen, was eine Zurückstufung der Funktionalität in SAE Level 2 entspricht (z. B. Gold, Lorenz, et al., 2013).

Unter adaptiven Eingriffen sind in diesem Zusammenhang solche Interaktionen gemeint, bei denen eine Bandbreite an Dringlichkeit und Salienz der Übernahmeaufforderungen zum Einsatz kommt. Dies bedeutet, dass für lange im Voraus bekannte Systemgrenzen beispielsweise unaufdringliche visuelle und akustische Anzeigen eingesetzt werden können oder auf letztere zunächst sogar ganz verzichtet werden kann. Die gebotene Eskalation der Warnstufen mit Herannahen der Systemgrenze bei ausbleibendem Fahrereingriff bleibt hiervon unberührt. Bei unerwarteten Hindernissen mit akutem Handlungsbedarf seitens des Fahrers kann hingegen sofort die maximal dringliche Warnstufe ausgegeben werden.

Unter nicht-adaptiven Eingriffen werden entsprechend Systeme verstanden, welche den Fahrer unabhängig von der Entfernung und Art der Systemgrenze immer auf dieselbe Weise zur Übernahme der Fahrzeugkontrolle auffordern. Aus Sicherheitsgründen ist hier immer eine maximal dringliche Warnstufe zu wählen.

Verschiedene Gründe sprechen zunächst für den Einsatz adaptiver Übernahmeaufforderungen. Wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert, könnten Fahrer im automatisierten Fahren in absehbarer Zukunft relativ häufig mit Übernahmeaufforderungen konfrontiert werden. Die Akzeptanz wiederkehrender hoch dringlicher Warnungen während einer längeren Autobahnfahrt dürfte gering sein. Zusätzlich ist zu erwarten, dass die Warnungen ihre Wirkung auf den Fahrer durch Adaptation verlieren, insbesondere wenn ihre Intensität in vielen Situationen nicht in angemessenem Verhältnis zur Verkehrssituation steht. Anders sollte es sich bei adapti-

ven Transitionskonzepten verhalten: Für die mehrheitlich unkritischen Übernahme-situationen wird der Fahrer anfänglich z. B. nur visuell oder mit Sitzvibrationen gewarnt. Übernimmt er daraufhin die Fahrzeugführung, kann auf weitere Eskalationsstufen verzichtet werden und etwaige andere Personen im Fahrzeug würden von der diskreten Übernahme kaum etwas mitbekommen. Dringliche Warnungen blieben dann plötzlichen Systemgrenzen mit akutem Handlungsbedarf vorbehalten und büßten nichts von ihrer alarmierenden Wirkung ein.

In der vorliegenden Arbeit soll durch den Vergleich verschiedener Konzepte zur Übergabe der Fahrzeugkontrolle an den Fahrer der Nutzen von Adaptivität selbst in den Fokus gerückt werden, wobei hierbei Aspekte der Übernahmequalität und -sicherheit ebenso berücksichtigt werden müssen wie die Akzeptanz solcher Systeme durch den Fahrer.

Im folgenden Abschnitt wird die verfügbare Literatur zu adaptiven L3-Transitionskonzepten wiedergegeben. In diesem Zusammenhang sind vor allem Studien relevant, welche in Abhängigkeit bestimmter Rahmenbedingungen unterschiedliche Transitionskonzepte präsentieren und einen möglichen Mehrwert von Adaptivität systematisch durch Variation untersuchen. Studien, welche bestimmte Transitionskonzepte mit bestimmten Kontextausprägungen zur Beantwortung einer Forschungsfrage lediglich koppeln (z. B. wenn bei Erreichen eines bestimmten Müdigkeitslevels eine Übernahmeaufforderung gegeben wird), sollen an dieser Stelle nicht referiert werden.

2.2.5.3 Adaptive Transitionskonzepte in Bezug auf die Dringlichkeit der Verkehrssituation

Eine mögliche Richtgröße für die Gestaltung von Transitionskonzepten bildet die Dringlichkeit der Verkehrssituation:

- Roche und Brandenburg (2019) gaben in Abhängigkeit des zur Verfügung gestellten Zeitbudgets in Übernahme-situationen unterschiedlich dringliche Warnungen an den Fahrer aus. Die Zeitbudgets entsprachen 3 s bzw. 7 s. Die beiden auditiv-taktilen Übernahmeaufforderungen unterschieden sich in der Dringlichkeit durch unterschiedlich nachdrückliche Wortwahl bei der Sprachausgabe. Der Vergleich zwischen kompatiblen (d. h. viel Zeit = wenig dringliche Wortwahl bzw. wenig Zeit = hoch dringliche Wortwahl) und inkompatiblen (vice versa) Paarungen aus Zeitbudget und Wortwahl ergaben keine Vorteile einer Passung zwischen den beiden Faktoren.
- Van der Heiden, Iqbal und Janssen (2017) verglichen zweierlei akustische „Vorwarnungen“ 20 s vor der eigentlichen Übernahmeaufforderung und konnten zeigen, dass Signaltöne, welche mit Annäherung an das Hindernis in der Häufigkeit eskalieren, signifikant frühere Unterbrechungen einer FFT bewirken gegenüber einem gleichförmigen Signalmuster.

2.2.5.4 Adaptivität in Bezug auf die erforderliche Fahrerreaktion

Transitionskonzepte können sich ferner an der erforderlichen Reaktion des Fahrers orientieren. Hierzu zählen Studien mit sogenannten richtungsgebenden Übernahmeaufforderungen:

- Cohen-Lazry, Katzman, Borowsky und Oron-Gilad (2019) verglichen richtungsgebende Sitzvibrationen in Übernahmesituationen, bei denen die Probanden die Spur wechseln mussten. Es zeigte sich, dass Fahrer signifikant schneller reagierten, wenn die Vibrationsrichtung kompatibel mit der erforderlichen Ausweichrichtung war als wenn sie inkompatibel war. Die Probanden konnten somit die Richtungsinformation erfolgreich nutzen.
- Petermeijer, Bazilinsky, Bengler und De Winter (2017) sowie Petermeijer, Cieler und De Winter (2017) fanden hingegen in ähnlichen Untersuchungen keinen oder nur einen geringen zusätzlichen Nutzen gerichteter gegenüber ungerichteter Sitzvibrationen.

2.2.5.5 Adaptivität in Bezug auf den Fahrerzustand

Vereinzelte finden sich auch Arbeiten, die sich bei der HAF-Funktionalität am Fahrerzustand orientieren. Meist ist hiermit die Aufmerksamkeit des Fahrers gemeint:

- Cabrall, Janssen und De Winter (2018) zogen beispielsweise die mittels Eye-Tracking gemessene Fahreraufmerksamkeit als Kriterium für die Verfügbarkeit von Automation heran. Die Fahrer sollten an bestimmten Punkten eine vorgegebene visuell-manuelle FFT ausführen. U. a. wurden zwei Bedingungen verglichen: In der „Backup“-Bedingung fuhren die Probanden manuell und die Automation übernahm die Fahrzeugkontrolle während der FFT-Bearbeitung. In der „Forced“-Bedingung fuhren die Probanden automatisiert, mussten aber während der FFT-Bearbeitung manuell fahren. Es zeigte sich hierbei, dass die der Fahrerablenkung entgegenkommende „Backup“-Bedingung u. a. die Spurführung während der FFT deutlich verbesserte gegenüber der - der Fahrerablenkung zuwiderlaufenden - „Forced“-Bedingung.
- Gaspar, Schwarz, Kashef, Schmitt und Shull (2018) koppelten den Zeitpunkt der Ausgabe von Übernahmeaufforderungen an das gemessene Aufmerksamkeitsniveau der Probanden. Diese Variante brachte deskriptiv einen kleinen, aber nicht signifikanten Mehrwert hinsichtlich der Reaktionszeiten gegenüber nicht adaptiven Übernahmeaufforderungen.

2.2.5.6 Allgemeinpsychologische Grundlagen mit Verbindung zu adaptiven Transitionskonzepten

Die vorliegende Arbeit kann sich auch hinsichtlich der zu untersuchenden adaptiven Transitionskonzepte auf allgemeinpsychologische Untersuchungen zu Aufgabenwechseln stützen. Schließlich spielt dort insbesondere der Zeitpunkt des Hinweisreizes, welcher den Probanden über die kommende auszuführende Auf-

gabe informiert, eine wesentliche Rolle (vgl. Abschnitt 2.2.3). Mit wachsender Zeitspanne zwischen Hinweisreiz und Stimulus reagieren Probanden prinzipiell schneller und zuverlässiger auf wechselnde Aufgaben. Gleichzeitig sind diesem Phänomen in beiden Richtungen Grenzen gesetzt: Eine sehr kurze Vorbereitungszeit geht mit erhöhten Reaktionszeiten und Fehlerraten einher, während sehr lange Vorbereitungszeiten die Wechselkosten ab einem gewissen Grad nicht weiter senken und residuale Wechselkosten bestehen bleiben. Im Kontext von L3-Übernahmesituationen lässt sich ein ähnliches Muster beobachten. Bei sehr kurzfristigen Übernahmeaufforderungen vor der Systemgrenze des L3-Fahrzeugs verschlechtert sich die Qualität der Übernahme. Dies konnten Gold, Damböck, et al. (2013) für ein Zeitbudget von 5 s gegenüber 7 s nachweisen. Andererseits wird angenommen, dass sich die Übernahme ab einer Zeitspanne von etwa 10 s nicht mehr weiter verbessert (Radlmayr & Bengler, 2015; Walch, Lange, Baumann & Weber, 2015).

2.2.5.7 Zwischenfazit adaptive Transitionskonzepte

Zur Wirksamkeit adaptiver Transitionskonzepte in L3-Übernahmesituation existieren vergleichsweise wenige Studien und die Befundlage ist heterogen. Für alle drei erörterten Richtgrößen von Adaptivität finden sich jedoch zumindest teilweise Hinweise auf einen Nutzen adaptiver Varianten. Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die Befunde zur fahrerzustandsbezogenen Adaptivität relevant. Im Beitrag von Cabrall et al. (2018) zeigte sich ein deutlicher Effekt der Manipulationen. Allerdings waren hier sowohl die Richtgröße für Adaptivität (Bearbeiten einer FFT oder nicht) als auch die Varianten der Adaptivität (Automation oder manuelles Fahren) sehr grob abgestuft. Die vorliegende Arbeit wird u. a. der Frage nachgehen, ob auch einzelne Merkmale der FFT eine geeignete Richtgröße für wirksame adaptive Transitionskonzepte darstellen können.

2.3 Zwischenfazit

Mit der Einführung von L3-Fahrzeugen tritt an die Stelle paralleler Aufgabebearbeitung während des Fahrens eine Sequenz aus Fahrzeugführung und der Befassung mit fahrfremden Tätigkeiten mit mehr oder weniger zahlreichen Wechseln zwischen diesen beiden Zuständen. Die allgemeinspsychologische Grundlagenforschung bietet eine umfassende Basis an Erkenntnissen zu Aufgabenwechseln. Kernbefund ist die Gegebenheit sogenannter Wechselkosten – Aufgabenwechsel gehen in der Regel mit verlängerten Reaktionszeiten und verminderter Aufgabenleistung einher. Dabei spielen sowohl die zur Verfügung stehende Zeitspanne vor der erforderlichen Reaktion als auch etwaige Störeinflüsse aus vergangenen Aufgaben eine entscheidende Rolle. Im Kontext des automatisierten Fahrens liegen zahlreiche Befunde zu den Einflüssen von Merkmalen fahrfremder Tätigkeiten in L3-Übernahmesituationen vor. Dabei fällt auf, dass bisherige Untersuchungen tendenziell auf standardisierte Operationalisierungen der FFT fokussieren (n-Back Task, SURT etc.). Hierdurch werden Faktoren vernachlässigt, welche vor allem bei den in der Realität zu erwartenden FFT eine Rolle spielen dürften. Dazu zählen vor allem ein erheblicher motorischer Unterbrechungsaufwand

der Tätigkeiten sowie ein hoher intrinsischer Anreiz zu deren Weiterbearbeitung. Adaptive Transitionskonzepte, welche Zeitpunkt und Dringlichkeit von Übernahmeaufforderungen an situative Faktoren knüpfen, könnten in diesem Zusammenhang invariablen Konzepten hinsichtlich Wirksamkeit und Akzeptanz überlegen sein. Im folgenden empirischen Teil der Arbeit sollen zunächst die Besonderheiten natürlicher FFT herausgearbeitet werden. Im Anschluss wird der Einfluss zentraler Tätigkeitsmerkmale auf die Leistung von Fahrern in Übernahmesituationen untersucht. Abschließend wird der Frage nachgegangen, welche Rolle dabei adaptive Transitionskonzepte spielen könnten.

3 Simulatorstudien

3.1 Empirische Fragestellungen und Hypothesen

3.1.1 Durch welche in Übernahme-situationen relevanten übergeordneten Merkmale zeichnen sich natürliche fahrfremde Tätigkeiten im Besonderen aus?

Für die Abbildung der während automatisierter Fahrabschnitte zu erwartenden Ablenkungsbedingungen ist vor allem die Untersuchung solcher FFT interessant, welche sich möglichst nah an natürliche Beschäftigungen anlehnen. In Studie 1 der vorliegenden Arbeit soll hierzu eine entsprechende Auswahl an FFT und deren Auswirkungen auf die Fahreraufmerksamkeit untersucht werden. Ziel ist dabei, übergeordnete Aufgabenmerkmale zu identifizieren, welche in Übernahme-situationen relevant sind. Dabei wird angenommen, dass besonders FFT mit ausgeprägter motorischer Komponente die Übernahme erschweren.

3.1.2 Welchen Einfluss haben diese Merkmale auf die Übernahmeleistung des Fahrers?

Studie 2 nimmt die in Studie 1 gefundenen Tätigkeitsmerkmale „Unterbrechungsaufwand“ und „Anreiz zur Aufgabenbearbeitung“ als Grundlage für systematische Untersuchung mit höherem Standardisierungsgrad. Es wird angenommen, dass mit steigendem Unterbrechungsaufwand sowie mit wachsendem Tätigkeitsanreiz eine Verschlechterung der Übernahmequalität einhergeht.

3.1.3 Welches Potenzial besitzen Übernahmeaufforderungen, die adaptiv sind in Bezug auf diese Merkmale?

Die Studien 3 und 4 beschäftigen sich mit adaptiven Transitionskonzepten. In Studie 3 werden variable Übernahmeaufforderungen, welche sich an den Merkmalen „Unterbrechungsaufwand“ und „Tätigkeitsanreiz“ orientieren, mit invariablen Übergabekonzepten verglichen. Es wird angenommen, dass invariable Übernahmeaufforderungen durch Habituation des Fahrers mit der Zeit einen Teil ihrer Wirkung verlieren und dies sowohl die Übernahmequalität als auch die Systemakzeptanz durch den Fahrer beeinträchtigt. Dagegen wird für variable Übernahmeaufforderungen von einer gleichbleibend hohen Wirksamkeit und Akzeptanz ausgegangen.

In Studie 4 wird nur der Unterbrechungsaufwand als wichtige Kenngröße in Übernahme-situationen beibehalten und ein etwas anderer Ansatz gewählt, um einen möglichen Mehrwert adaptiver Übernahmeaufforderungen abzubilden. Dazu werden der Unterbrechungsaufwand einer FFT sowie der Warnzeitpunkt variiert, hierdurch können kompatible Übernahmeaufforderungen (hoher Unterbrechungsaufwand = frühe Warnung et vice versa) mit inkompatiblen Übernahmeaufforderungen (hoher Unterbrechungsaufwand = späte Warnung et vice versa) verglichen werden. Der Einsatz zweier unterschiedlicher Warntöne für die frühe und späte Warnung dient dem Fahrer dabei als zuverlässiger Indikator für die zur Verfügung stehende Restzeit. Es wird erwartet, dass die Übernahmeaufforderungen von Systemen, bei denen der Warnzeitpunkt zum

Unterbrechungsaufwand passt, rechtzeitige Übernahmen der Fahrzeugkontrolle sowie hohe Akzeptanzbewertungen fördern, da sie vom Fahrer als vorhersehbar, aussagekräftig und zuverlässig wahrgenommen werden. Für Systeme, bei denen der Warnzeitpunkt nicht zum Unterbrechungsaufwand passt, wird angenommen, dass die entsprechenden Übernahmeaufforderungen zu frühe bzw. zu späte Übernahmen und allgemein geringere Akzeptanzbewertungen bewirken, da sie vom Fahrer als weniger vorhersehbar, aussagekräftig und zuverlässig wahrgenommen werden.

3.2 Methoden

Die vier empirischen Studien der vorliegenden Arbeit weisen zahlreiche Gemeinsamkeiten in der Methodik auf. Der folgende Abschnitt liefert deshalb einen studienübergreifenden Methodenteil, welcher den Beschreibungen der einzelnen Studien vorangestellt ist.

3.2.1 Fahrsimulation

Die Studien 1 und 2 wurden im dynamischen Fahr Simulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) durchgeführt (vgl. *Abbildung 8*). Dieser besteht aus der Fahrerkabine eines voll instrumentierten BMW 520i Serienfahrzeugs mit Automatikgetriebe. Dem Simulator liegt ein physikalisches Fahrzeugmodell zugrunde, welches die wesentlichen Bestandteile wie z. B. Antriebsstrang, Lenkung und Reifen durch eine Mehrkörper-Simulation nachbildet. Darüber hinaus verfügt der Simulator über ein Bewegungssystem in Form einer Stewart-Plattform (6 Freiheitsgrade), welche lineare Beschleunigungen bis 5 m/s² sowie rotatorische Beschleunigungen bis 100 m/s² ermöglicht. Die visuelle Darstellung erfolgt über ein Projektionssystem mit sphärischer Leinwand, welches dem Fahrer das Fahrzenario in einem Sichtfeld von 240° anzeigt. Die Sicht in Rück- und Außenspiegeln sowie Navigations- und Nebenaufgaben werden mithilfe von LCD-Displays dargestellt. Über das eingebaute Achtkanal-Soundsystem werden last- und drehzahlabhängige Motorgeräusche sowie Roll- und Windgeräusche simuliert.



Abbildung 8. Der dynamische WIVW-Fahr-Simulator. Hexapod Bewegungssystem (links) und Simulator-Innenraum mit Fahrzeug-Mockup und Videoprojektion (rechts).

Die Studien 3 und 4 wurden im statischen Fahrsimulator des WIVW durchgeführt. Der Simulator besteht aus einem voll instrumentierten Opel Insignia Serienfahrzeug mit Automatik. Auch diesem Simulator liegt ein physikalisches Fahrzeugmodell zugrunde, welches die wesentlichen Bestandteile, wie z. B. Antriebsstrang, Lenkung und Reifen durch eine Mehrkörper-Simulation nachbildet. Die visuelle Darstellung erfolgt auch hier über ein Projektionssystem mit sphärischer Leinwand, welches dem Fahrer das Fahrszenario in einem Sichtfeld von 300° visualisiert. Die Sicht in Rück- und Außenspiegeln wird mithilfe von LCD-Displays dargestellt. Die Soundsimulation verwendet die vier in den Türen befindlichen Original-Lautsprecher des Fahrzeugs, um last- und drehzahlabhängige Motorgeräusche sowie Roll- und Windgeräusche zu simulieren.

3.2.2 Automatisierte Fahrfunktion

Das verwendete Automationssystem umfasste die laterale und longitudinale Fahrzeugführung (L3) mit einer angestrebten Geschwindigkeit von 120 km/h. Die Geschwindigkeit wurde erzielt, wann immer kein langsames Vorderfahrzeug vorhanden war. Zu langsameren Vorderfahrzeugen wurde ein Folgeabstand von 2 s eingehalten. Die Aktivierung und Deaktivierung des Systems erfolgte durch gleichzeitige Betätigung zweier Lenkradtasten, welche bei normaler Lenkradhaltung („zehn Uhr und zwei Uhr“) einfach mit den Daumen zu erreichen waren. Ebenfalls konnte das L3-System durch Bremsen sowie durch Lenken über 2° Lenkwinkel deaktiviert werden. Spurwechsel waren während der HAF-Fahrt nicht erforderlich und wurden weder durch die Fahrer noch durch das Fahrzeug vorgenommen.

3.2.3 Statistische Auswertungsverfahren

Für die statistischen Tests kam IBM® SPSS® Statistics Version 25 zum Einsatz. Die gewonnenen Daten wurden zunächst deskriptiv analysiert und dargestellt, sowie im Anschluss folgende Auswertungen zugeführt:

- In Studie 1 wurde für den globalen Vergleich von Übernahmezeiten mit und ohne Fahrerablenkung eine einfaktorische Varianzanalyse mit Messwiederholung gerechnet. Für die Einzelvergleiche der FFT im Vergleich zu Fahrten ohne FFT kamen gerichtete Innersubjektkontraste zur Anwendung. Unterschiede zwischen den FFT in objektiven und subjektiven Maßen wurden mit abhängigen t-Tests geprüft.
- In Studie 2 wurden auf Ebene der objektiven Daten 2(Art der FFT) x 2(Unterbrechungsaufwand) – Varianzanalysen mit Messwiederholung gerechnet. Auf subjektiver Ebene erfolgte die Prüfung der Unterschiede zwischen der Art der FFT und zwischen den Unterbrechungsvarianten mittels abhängiger t-Tests. Zur Auswertung der zusammenfassenden FFT-Bewertung (Nachbefragung) wurden ebenfalls t-Tests für abhängige Stichproben gerechnet.

- In Studie 3 wurde auf Ebene der objektiven Daten eine univariate 3(Transitionskonzept) x 8(Übernahmesituation) Varianzanalyse gerechnet, wobei das Transitionskonzept als *between*-Faktor und die Übernahmesituationen als *within*-Faktor in die Analyse gingen. Zum Vergleich einzelner Übernahmesituationen untereinander kamen nachgelagerte Innersubjekttraste zur Anwendung. Auf subjektiver Ebene wurden zur Beurteilung der Übernahmesituationen 3(Transitionskonzept) x 3(Übernahmesituation) Varianzanalysen gerechnet. Auch hier gingen das Transitionskonzept als *between*-Faktor und die Übernahmesituationen als *within*-Faktor in die Analyse ein. Der Vergleich der Übernahmesituationen untereinander erfolgte mittels gerichteter Innersubjekttraste. Darüber hinaus wurden zum Vergleich der FFT-Bewertungen in Abhängigkeit des Tätigkeitsanreizes (Nachbefragung) wie in Studie 2 t-Tests für abhängige Stichproben gerechnet.
- In Studie 4 wurden auf Ebene der objektiven sowie subjektiven Daten 2(Unterbrechungsaufwand) x 2(Zeitbudget) Varianzanalysen mit doppelter Messwiederholung gerechnet. Für den Vergleich von kompatiblen und inkompatiblen Durchgängen auf der Van der Laan-Skala kamen t-Tests für abhängige Stichproben zum Einsatz.

3.2.4 Stichproben

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Stichproben der empirischen Studien. Alle Teilnehmer entstammten dem WIVW Testfahrer-Panel und hatten ein umfangreiches Simulatortraining absolviert. Neben einer Erhöhung der Fahrsicherheit lassen sich dadurch auch Übungseffekte während der Fahrten abmildern (Buld, Krüger, Hoffmann, & Totzke, 2003). Voraussetzung für die Teilnahme war darüber hinaus Erfahrung im Umgang mit Smartphones oder Tablets.

Studie	1	2	3	4
Anzahl	$N = 19$ (12 m, 7 w)	$N = 23$ (10 m, 13 w)	$N = 58$ (30 m, 28 w)	$N = 50$ (27 m, 23 w)
Alter (Jahre)	$m = 28$; $sd = 6$ (22 bis 42 Jahre)	$m = 37$; $sd = 12.6$ (21 bis 60 Jahre)	$m = 32$; $sd = 9.8$ (19 bis 54 Jahre)	$m = 36.4$; $sd = 11.3$ (21 bis 58 Jahre)

Tabelle 2. Übersicht zu den Studienstichproben.

3.3 Studie 1: Einflüsse naturalistischer fahrfremder Tätigkeiten auf Übernahme-kriterien im hochautomatisierten Fahren

3.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle in der Übernahme-situation bestand aus einer visuellen Anzeige im *Head-Up-Display* des Fahrzeugs sowie einer akustischen Ausgabe. Dabei gab es zweierlei Eskalationsstufen. In Stufe 1 (vgl. Abbildung 9) wurde dem Fahrer im Head-Up-Display ein vorwiegend in Orange gehaltenes Piktogramm eingeblendet, in dem symbolisch das Ergreifen des Lenkrades dargestellt war. Als dynamisches Element war die Darstellung von einem Farbkreis umgeben, welcher in Sekundenschritten mit Verstärken der Zeit segmentweise ablief. Zeitgleich wurde ein Signalton (900 Hz, 300 ms) ausgegeben. In Eskalationsstufe 2 wurde die beschriebene Anzeige weiterhin dargeboten, die Farbgebung wechselte jedoch in Rot und es wurde zu Beginn von Stufe 2 ein weiterer Signalton (900 Hz, 300 ms) ausgegeben.

3.3.2 Prüfzenario

Bei der untersuchten Systemgrenze handelte es sich um einen Sensorausfall auf einer 3-spurigen Autobahn an der Einfahrt einer Rechtskurve (Abbildung 9). Das Fahrzeug des Probanden fuhr automatisiert auf der rechten Spur geradeaus bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h. 4 s vor Erreichen der Kurveneinfahrt wurden die Probanden durch die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene visuell-auditive Übernahmeaufforderung zur manuellen Fahrzeugführung aufgefordert. Das Fahrzeug ging an dieser Stelle ins Schleppmoment (Abschaltung der Längsführung, Stufe 1). Bei ausbleibender Fahrerreaktion wurde die Übernahmeaufforderung nach weiteren 2 s (und somit 2 s vor Kurvenbeginn) mit erhöhter Dringlichkeit erneut dargeboten (Stufe 2). An dieser Stelle schaltete die Querführung ab, das Fahrzeug rollte jedoch weiter geradeaus. Bei weiterhin ausbleibender Fahrerreaktion wäre es somit ab Kurvenbeginn zur Abweichung von der Spurmitte und zu Spurübertretungen gekommen – das Fahrzeug wäre in der Kurve geradeaus weitergerollt. Zu jedem Zeitpunkt konnte der Fahrer das System, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, deaktivieren und manuell weiterfahren. Die dargebotenen Anzeigen verschwanden dann unmittelbar.

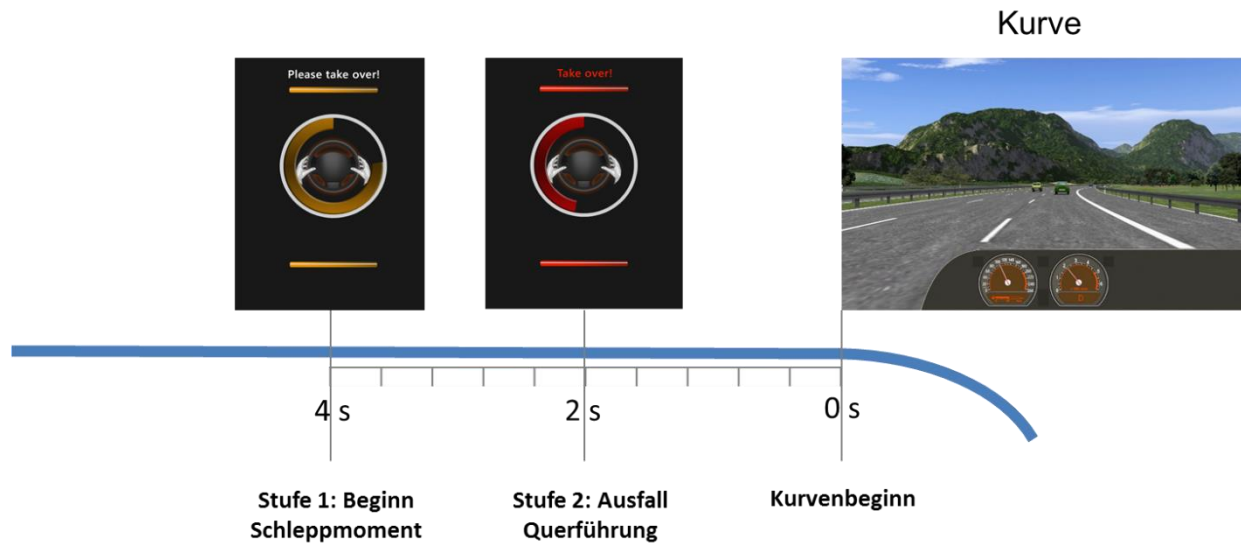


Abbildung 9. Schematische Darstellung der Prüfsituation von Studie 1 und der dazugehörigen visuellen Anzeigen im *Head-Up-Display* des Fahrzeugs im Zeitverlauf. Die blaue Kurve symbolisiert den Streckenverlauf.

3.3.3 Unabhängige Variable

Die unabhängige Variable der Untersuchung bestand in fünf verschiedenen fahrfremden Tätigkeiten. Aufbauend auf der in Abschnitt 2.2.4.1 dargestellten Literatur zum Thema, lag das Hauptaugenmerk auf einer möglichst realistischen Abbildung fahrfremder Tätigkeiten mit folgenden Merkmalen:

- Die Aufgaben sollten **angenehm** sein, d. h. durch positive Merkmale wie Belohnung oder Zerstreuung zu deren Fortführung einladen (vgl. Kyriakidis et al., 2015).
- Sie hatten darüber hinaus **natürlich** zu sein, d. h. sie sollten so oder in ähnlicher Form mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von Menschen in echten automatisierten Fahrzeugen frei gewählt und ausgeführt werden (vgl. Hecht et al., 2019).
- Zusätzlich war darauf zu achten, dass sich die untersuchten Tätigkeiten möglichst stark unterscheiden hinsichtlich ihres motorischen, visuellen und kognitiven Aufwands.

Die folgenden FFT wurden in der Studie eingesetzt (siehe Abbildung 10):

- **Kognitive Beanspruchung (Kopfrechnen)**

Für diese rein kognitive FFT wurden den Probanden während der HAF-Fahrt vom Versuchsleiter Kopfrechenaufgaben zur Tankreichweite in Abhängigkeit verschiedener Kraftstoffverbräuche gestellt (z. B. „Angenommen Ihr Fahrzeug verbraucht sieben Liter Kraftstoff pro 100 km, wie hoch ist Ihre rechnerische Tankreichweite, wenn sich noch 50 Liter Kraftstoff im Tank befinden?“). Die Aufgabe ist in ihren Grundzügen vergleichbar mit einem Telefongespräch am Steuer mittels Freisprecheinrichtung (wechselseitige Kommunikation in Echtzeit, mittlere kognitive Anforderungen).

- **Nachrichten-Videos auf einem Tablet betrachten**

Eine weitere Aufgabe der Probanden war es, während der HAF-Fahrt auf einem zur Verfügung gestellten Tablet Nachrichtensendungen zu betrachten. Hierzu wurden inhaltliche Fragen angekündigt, um ein aufmerksames Verfolgen anzuregen. Das Tablet musste in den Händen gehalten werden. Die Aufgabe entspricht in Ihren Grundzügen dem weit verbreiteten Betrachten von Online-Videos zu Zwecken der Unterhaltung und Information. Um bei Übernahmeaufforderungen keine Nachrichten zu verpassen, mussten die Videos jeweils vor Übernahme pausiert werden.

- **Tetris® spielen auf einem Tablet**

Bei dieser intrinsisch motivierenden, beidhändigen Tätigkeit mit Hand- und Fingereinsatz wurden die Probanden instruiert, während der HAF-Fahrt auf dem zur Verfügung gestellten Tablet das Geschicklichkeitsspiel Tetris zu spielen. Mit dieser Aufgabe werden die ebenfalls weit verbreiteten und beliebten Smartphone-Spiele in Ihren Grundzügen abgebildet. Um bei Übernahmeaufforderungen nicht den Anschluss an das Spiel zu verlieren, musste dieses jeweils vor Übernahme pausiert werden.

- **Körperdrehung weg von zentralem Sichtfeld (Suchaufgabe auf Rückbank)**

Aufgabe der Probanden war es bei dieser Tätigkeit, während der HAF-Fahrt in einer hinter dem Beifahrersitz angebrachten Kiste aus einer großen Menge Distraktor-Elementen (schwarze Kunststoffbausteine) einige wenige Zielelemente (rote Kunststoffbausteine) herauszusuchen. Die Aufgabe bildet gleichermaßen das Suchen von Objekten im Fond sowie die Beschäftigung mit anderen Fahrzeuginsassen auf den Rücksitzen in deren Grundzügen ab.

- **Referenzaufgabe: Keine fahrfremde Tätigkeit ausüben**

Als Referenzaufgabe wurden die Probanden in einer weiteren Bedingung dazu angeregt, sich zurückzulehnen und die Aussicht aus dem Fahrzeug zu genießen. Dies ermöglicht den Vergleich der Übernahmeleistung zwischen Fahrten mit den verschiedenen FFT und Fahrten nicht abgelenkter Fahrern.





Aufgabe	Video auf Tablet ansehen	Suchaufgabe auf Rückbank	Tetris spielen auf Tablet	Kopfrechnen
				
Motorischer Aufwand	+	+++	++	-
Visueller Aufwand	++	+++	++	-
Kognitiver Aufwand	+	+	++	+++

Abbildung 10. Untersuchte fahrfremde Tätigkeiten (nicht abgebildet: Referenzaufgabe) und deren angenommener motorischer, visueller und kognitiver Aufwand. Fotos: D: Befelein.

3.3.4 Abhängige Variablen

Auf objektiver Ebene wurde mittels Videoanalyse gemessen, wie lange es ab dem Ausgabezeitpunkt der Übernahmeaufforderung jeweils dauerte, bis der Proband den Blick auf die Straße richtete, die Hände von Gegenständen befreite (nur bei vorheriger Handbelegung), das Lenkrad mit mindestens einer Hand ergriff und schließlich das System durch beidseitigen Tastendruck am Lenkrad deaktivierte. Für das Ergreifen des Lenkrades spielte es keine Rolle, ob die andere Hand schon komplett frei war.

Auf subjektiver Ebene wurde nach jeder erlebten Übernahmesituation eine entsprechende Kritikalitätsbeurteilung abgefragt. Die hierzu verwendete Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen stammt von Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser und Steinle (2008) (Abbildung 11). Der Proband wurde hierbei gefragt: "Wie kritisch war die gerade erlebte Situation?" und beantwortete die Frage anhand einer Likert-Skala von 0 ("gar nichts bemerkt") bis 10 ("unkontrollierbar"). Sämtliche abhängigen Variablen von Studie 1 sind zusammenfassend in Tabelle 3 dargestellt.

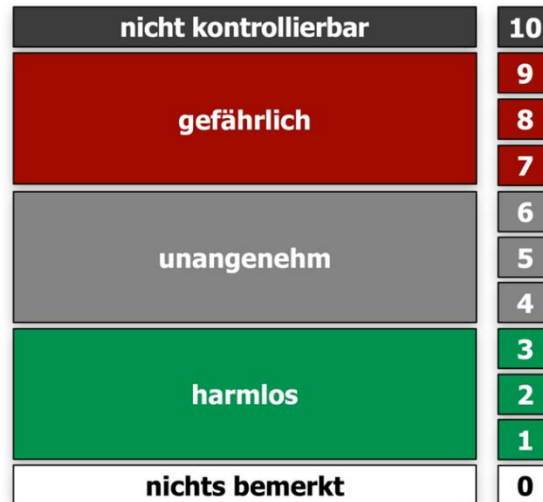


Abbildung 11. Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen nach Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser und Steinle (2008).

	Name	Erfassung	Einheit
Objektive Variablen	Blickorientierung zur Straße	Videoanalyse	[s]
	Befreiung der Hände	Videoanalyse	[s]
	Ergreifen des Lenkrads	Videoanalyse	[s]
	Systemdeaktivierung (Tasten)	Videoanalyse	[s]
Subjektive Variablen	Kritikalitätsbewertung	Skala nach Neukum et al. (2008)	Skalenpunkte [0...10]

Tabelle 3. Abhängige Variablen in Studie 1.

3.3.5 Versuchsplan

Bei der Untersuchung handelte es sich um ein komplettes *within*-Design: Jeder Proband erlebte fünf Übernahmesituationen, zu deren Zeitpunkt er jeweils eine der fünf fahrfremden Tätigkeiten ausführte. Die Reihenfolge der FFT wurde zwischen den Probanden randomisiert.

3.3.6 Versuchsablauf

Nach der Begrüßung erhielten die Versuchsteilnehmer alle erforderlichen Informationen über die bevorstehende Untersuchung. Eine Datenschutzbelehrung fand ebenfalls statt. Im Anschluss wurden die verschiedenen fahrfremden Tätigkeiten beschrieben und bei Bedarf demonstriert (z. B. Tetris spielen). Darüber hinaus bekamen die Teilnehmer die Aktivierung und Deaktivierung des L3-Systems erklärt. Es wurde darauf

hingewiesen, dass bei aktivem System die Aufmerksamkeit komplett von der Fahraufgabe abgewendet werden kann und das System auch nicht überwacht werden muss. Andererseits wurde auf die Möglichkeit von Übernahmeaufforderungen aufmerksam gemacht und dass der Fahrer in diesem Fall in der Lage sein muss, innerhalb eines komfortablen Zeitraums die Fahrzeugkontrolle zurückzuerlangen. Es wurde ferner darauf hingewiesen, dass die Fahrsicherheit hierbei immer Priorität gegenüber der Ausübung der fahrfremden Tätigkeiten hat. Im Anschluss an diese verbalen Erläuterungen fand eine kurze, ca. fünfminütige Eingewöhnungsfahrt statt, während derer die Fahrer das Aktivieren und Deaktivieren des Systems erlernen konnten. Das Erleben von Übernahmesituationen war nicht Gegenstand der Eingewöhnungsfahrt. In der Hauptfahrt waren die Probanden instruiert, das System zu aktivieren und der ersten der fünf fahrfremden Tätigkeiten nachzugehen. Nach etwa 3 min HAF-Fahrt erreichten sie die erste Systemgrenze und Übernahmeaufforderung. Nach etwa 30 s manuellen Fahrens wurde der Fahrer angeleitet, das L3-System wieder zu aktivieren, und es fand die in Abschnitt 3.3.4 beschriebene subjektive Befragung statt. Im Anschluss wurde die nächste der fünf fahrfremden Tätigkeiten instruiert, nach etwa 5 min Fahrt erfolgte die nächste Übernahmeaufforderung und so fort. Nach der Hauptfahrt wurden die Versuchspersonen für ihre Versuchsteilnahme entlohnt und verabschiedet. Insgesamt dauerte der Versuch ca. 45-60 min.

3.3.7 Ausschluss von Daten

Für die Analyse der mittleren Zeitdauer zwischen Ausgabe des TOR und des ersten Blicks auf die Straße wurden Übernahmesituationen ausgeschlossen, sofern der Fahrer im Moment der Ausgabe der Übernahmeaufforderung bereits den Blick auf die Straße gerichtet hatte und somit nicht von der beabsichtigten Fahrerablenkung ausgegangen werden kann (dieses Kriterium galt nicht für die Baseline und die FFT „Denken“). Für die relevanten FFT „Video“, „Rückbank“ und „Tetris“ war dies jeweils bei einem der 19 Probanden der Fall.

Für die Analyse der mittleren Zeitdauer zwischen Ausgabe des TOR und des aus der Hand Legens des Tablets wurden Übernahmesituationen ausgeschlossen, sofern der Fahrer im Moment der Ausgabe der Übernahmeaufforderung die Hände nicht mehr belegt hatte und somit nicht von der beabsichtigten Fahrerablenkung ausgegangen werden kann (dieses Kriterium wurde nicht auf die Baseline und die FFT „Denken“ angewendet). Für die in Frage kommenden FFT „Video“, „Rückbank“ und „Tetris“ war dies lediglich in der FFT „Video“ bei zwei der 19 Probanden der Fall.

Die betroffenen Übernahmesituationen gingen auch nicht in die Auswertung der subjektiven Daten ein.

3.3.8 Ergebnisse

3.3.8.1 Objektive Daten

Abbildung 12 zeigt die mittlere Zeitdauer zwischen der Ausgabe des Take-Over-Request (TOR) und den vier Bestandteilen einer Übernahmesequenz: (1) Blick auf die Straße richten (nur bei vorheriger Blickabwendung), (2) Hände frei machen (nur bei Aufgaben mit Handbelegung), (3) Lenkrad ergreifen sowie (4) beidseitiger Tastendruck zur Systemdeaktivierung. Die Ergebnisse der statistischen Tests sind in Tabelle 4 dargestellt. Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

- **Signifikant verzögerte Reaktionen in Übernahmesituationen mit FFT im Vergleich zu Situationen ohne FFT.** Alle eingesetzten FFT mit Ausnahme der Denkaufgabe gingen im Vergleich zur Baseline mit verzögertem Ergreifen des Lenkrades ($F(4,52) = 9.80; p < .001; \eta^2 = .43$) sowie verzögerter Deaktivierung des Systems durch Tastendruck einher ($F(4,52) = 3.01; p = .026; \eta^2 = .19$).
- **Signifikant verzögerte Reaktionen nach Tetris-Spiel im Vergleich zu anderen FFT.** Auch untereinander unterschieden sich die vier Ablenkungsbedingungen. Das Tetris-Spiel wies in allen Bestandteilen der Übernahmesequenz deskriptiv die größten Reaktionszeiten auf. Nach Durchführung einer Bonferroni-Korrektur zur Vermeidung von Alphafehlerkumulierung (Signifikanzniveau .05 geteilt durch die Anzahl der Tests) wurde im Tetris-Spiel noch immer signifikant später das Lenkrad ergriffen als beim Video-Spiel, der Suchaufgabe und der Denkaufgabe. Die Hände der Probanden waren bei der Suchaufgabe signifikant früher wieder frei als beim Tetris-Spiel und der Video-Aufgabe. Bei der Denkaufgabe wurde sehr früh wieder auf die Straße gesehen. Deutlich länger dauerte allerdings das Ergreifen des Lenkrades, welches nur im Tetris-Spiel signifikant später erfolgte. Besonders fielen jedoch späte Tastendrucke auf, welche einer großen Streuung unterlagen.

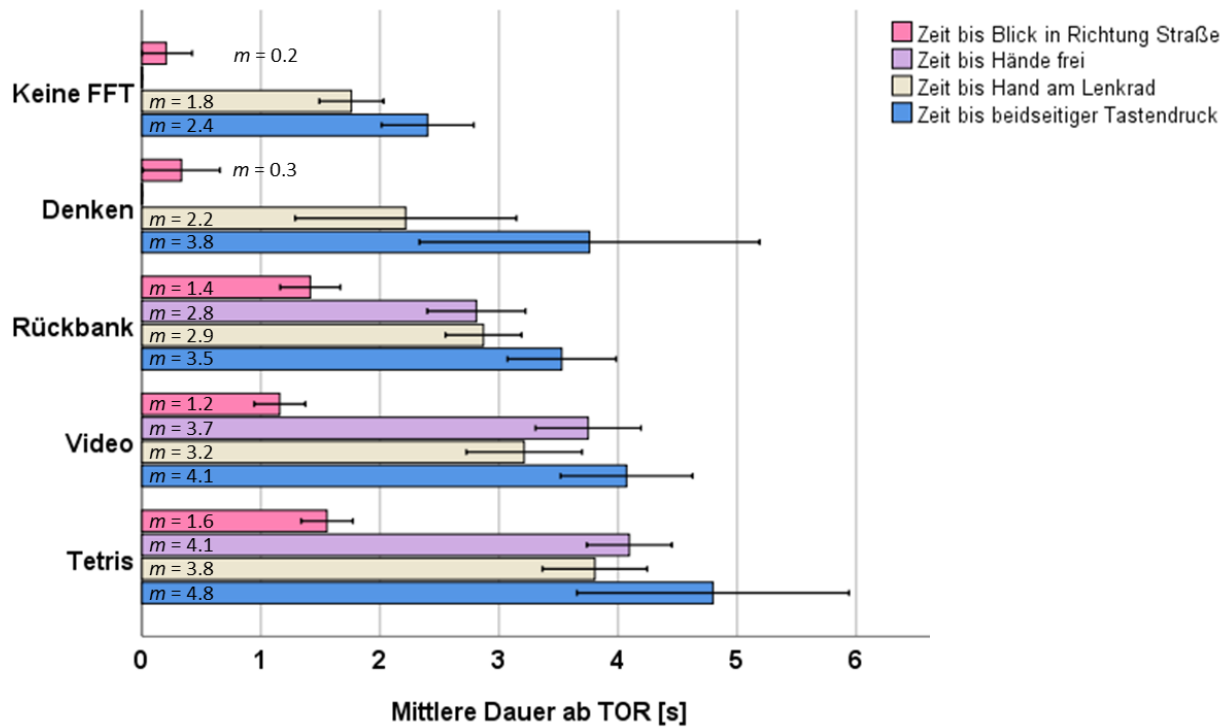


Abbildung 12. Einfluss der untersuchten Tätigkeiten auf verschiedene Übernahmemaße (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

(Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

		Reaktionsmaß			
		Blick in Richtung Straße	Hände frei	Hand am Lenkrad	Beidseitiger Tastendruck
Unterschiede zur Baseline	Video vs. Baseline	[nicht genügend Blickabwendungen bei TOR in Baseline]	[keine Handbelegung in Baseline]	$F(1,13) = 52.71;$ $p < .001; \eta^2 = .80$	$F(1,13) = 72.90;$ $p < .001; \eta^2 = .85$
	Rückbank vs. Baseline			$F(1,13) = 33.31;$ $p < .001; \eta^2 = .72$	$F(1,13) = 13.60;$ $p = .003; \eta^2 = .51$
	Tetris vs. Baseline			$F(1,13) = 92.24;$ $p < .001; \eta^2 = .88$	$F(1,13) = 12.30;$ $p < .001; \eta^2 = .50$
	Denken vs. Baseline			$F(1,13) = 2.10;$ $p = .172$	$F(1,13) = 2.64;$ $p = .128$
Unterschiede zwischen den FFT	Video vs. Rückbank	$t(14) = -1.09, p = .292$	$t(13) = 4.60, p = .001$	$t(14) = 1.27, p = .225$	$t(14) = 1.39, p = .186$
	Video vs. Tetris	$t(14) = -2.26, p = .041$	$t(14) = -2.92, p = .011$	$t(14) = -3.42, p = .004$	$t(14) = -1.52, p = .150$

	Video vs. Denken	[meist keine Blickabwendung bei Denkaufgabe]	[keine Handbelegung bei Denkaufgabe]	$t(15) = 2.06, p = .057$	$t(15) = 0.32, p = .755$
	Rückbank vs. Tetris			$t(16) = -3.87, p = .001$	$t(16) = -2.02, p = .061$
	Rückbank vs. Denken	[meist keine Blickabwendung bei Denkaufgabe]	[keine Handbelegung bei Denkaufgabe]	$t(17) = 1.37, p = .189$	$t(17) = -0.46, p = .651$
	Tetris vs. Denken			$t(17) = 4.15, p = .001$	$t(17) = 1.09, p = .290$

Tabelle 4. Ergebnisse der Signifikanztests zu den objektiven Daten.

3.3.8.2 Subjektive Daten

Abbildung 13 zeigt die Kritikalitätseinschätzungen der Situationen durch die Probanden im Anschluss an die jeweilige Situation. Tabelle 5 stellt die mittleren Kritikalitätsurteile für jede FFT dar. Die Ergebnisse der Signifikanztests sind in Tabelle 7 aufgelistet. Insgesamt zeigt sich:

- **Die Bearbeitung einer FFT im Moment der Übernahmeaufforderung geht mit kritischeren Situationsbewertungen einher.** Alle untersuchten Tätigkeiten mit Ausnahme der Denkaufgabe gingen mit signifikant kritischeren Bewertungen einher als Situationen ohne fahrfremde Tätigkeit.
- **Höchste Kritikalitätsbeurteilungen nach Tetris-Spiel.** Die kritischsten Bewertungen erhielt das Tetris-Spiel. Als „gefährlich“ bewertete Situationen traten überhaupt nur mit den beiden Tablet basierten Aufgaben (Video und Tetris) auf.
- **Insgesamt wenig kritische Bewertungen.** Die Kritikalität der Situationen wurde von den Fahrern überwiegend als „harmlos“ oder „unangenehm“ eingeschätzt.

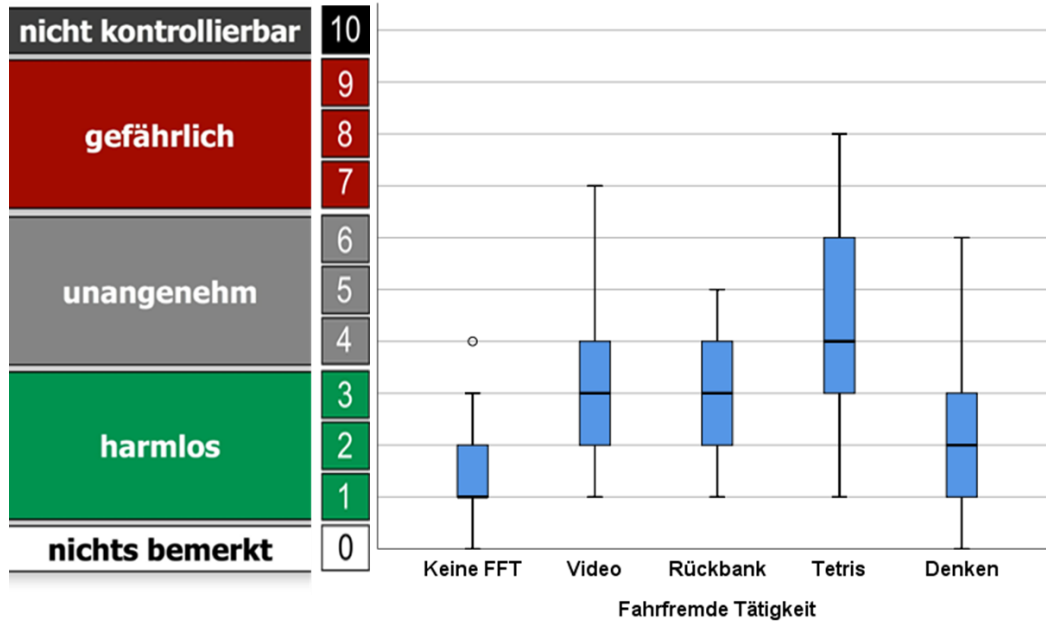


Abbildung 13. Einfluss der untersuchten Tätigkeiten auf Kritikalitätsurteile auf der Skala nach Neukum et al. (2008). Die Urteile wurden jeweils direkt nach den Prüfsituationen abgefragt.

FFT	Keine FFT	Video	Rückbank	Tetris	Denken
Wie kritisch war die Situation? [0...10]	1.5 (1.0)	3.2 (1.5)	2.7 (1.4)	4.0 (2.1)	2.4 (1.7)

Tabelle 5. Mittelwerte der Kritikalitätsbewertung auf der Skala nach Neukum et al. (2008) in Abhängigkeit der während der Übernahmeaufforderung ausgeführten fahrfremden Tätigkeiten (Standardabweichungen in Klammern).

Unterschiede zur Baseline	Video	$F(1,13) = 15.96; p = .002; \eta^2 = .55$
	Rückbank	$F(1,13) = 8.84; p = .011; \eta^2 = .41$
	Tetris	$F(1,13) = 27.71; p < .001; \eta^2 = .68$
	Denken	$F(1,13) = 3.74; p = .075$
Unterschiede zwischen den FFT	Video vs. Rückbank	$t(14) = .211, p = .826$
	Video vs. Tetris	$t(14) = -1.91, p = .076$
	Video vs. Denken	$t(15) = 2.19, p = .045$
	Rückbank vs. Tetris	$t(16) = -2.57, p = .021$
	Rückbank vs. Denken	$t(17) = .90, p = .381$
	Tetris vs. Denken	$t(17) = 2.81, p = .012$

Tabelle 6. Ergebnisse der Signifikanztests zu den subjektiven Daten.

3.3.8.3 Verhaltensbeobachtungen

Es wurde durchgehend beobachtet, dass Probanden während der Ausübung fahrfremder Tätigkeiten Ihre Aufmerksamkeit vollständig den Aufgaben widmeten und nahezu keine Kontrollblicke auf die Straße stattfanden. Somit kann von einem sehr hohen Systemvertrauen ausgegangen werden.

3.3.9 Zwischenfazit und Diskussion

Die objektiven und subjektiven Daten in Studie 1 folgen einem sehr ähnlichen Muster. Alle eingesetzten Ablenkungen verlängerten die Reaktionszeiten der Fahrer, wenn auch unterschiedlich stark und in wechselnden Ausprägungen. Auch die Kritikalitätsbeurteilungen waren unter Ablenkung mit Ausnahme der Denkaufgabe stets höher als ohne FFT. Das Tetris-Spiel wies in allen Dimensionen die größten Reaktionszeiten sowie die höchsten Kritikalitätsurteile auf, obwohl z. B. dessen motorischer Aufwand als geringer angesehen wird als der der Suchaufgabe. Es wird angenommen, dass zusätzlich zum visuell-manuellen Ressourcenverbrauch hier ein hoher Anreiz zum Weiterspielen und zur Vermeidung von Punktabzügen zum Tragen kam. Dass die beiden Tablet gebundenen Aufgaben mit den längsten Übernahmezeiten einhergingen, ist bemerkenswert und mag damit zusammenhängen, dass sie erst pausiert werden mussten, sofern der Fahrer keine Punkte verlieren (Tetris) oder das Video verpassen wollte. Selbst die – wie die Tablet Aufgaben visuell-manuelle – Suchaufgabe auf der Rückbank mit starker Körperorientierung nach hinten schnitt hier besser ab. Sie ging mit vergleichsweise kurzen Reaktionszeiten einher, unter Umständen weil es den Probanden hier leichter fiel, sich von der Aufgabe zu lösen. Entsprechend moderat fiel hier auch die Kritikalitätsbeurteilung aus. In die tendenziell kritischeren Beurteilungen der Tablet basierten Aufgaben könnte neben den hohen Übernahmezeiten auch die geringe gesellschaftliche Akzeptanz der Smartphone-Bedienung im manuellen Fahren einfließen. Bei der Denkaufgabe wurde der Blick rasch nach vorne gerichtet, es traten aber relativ große Mittelwerte und Streuungen beim Ergreifen des Lenkrades und dem Tastendruck auf. Vermutlich rechneten viele Fahrer auch nach Ergreifen des Lenkrads noch weiter, denn die Denkaufgabe war die einzige Aufgabe der Studie, deren Beendigung von außen nicht klar ersichtlich ist. Die Befunde unterstreichen die Bedeutung kognitiver Prozesse in Übernahmesituationen: Die rechnenden Fahrer blickten schnell auf die Straße, waren aber gedanklich noch abwesend, wie die Übernahmezeiten belegen. Die Denkaufgabe wurde von den Fahrern deskriptiv dennoch etwas weniger kritisch beurteilt als die Suchaufgabe auf dem Rücksitz. Ein Grund hierfür mag sein, dass die körperliche Orientierung nach hinten bei der Suchaufgabe als besonders fahrlässig und dadurch weniger akzeptabel wahrgenommen wird als das Rechnen am Steuer bei äußerlich unauffälligem Verhalten.

Mit der explorativ ausgerichteten Studie 1 ist es gelungen, eine beträchtliche Bandbreite an Kritikalitätsurteilen und Übernahmedauern in Abhängigkeit verschiedener natürlicher FFT abzubilden. Die Ergebnisse veranschaulichen die Heterogenität natürlicher FFT und ihrer Auswirkungen auf die Fahrerübernahme und

verdeutlichen, dass neben motorischen und visuellen FFT-Merkmalen auch der Anreiz zur Aufgabenfortsetzung eine wichtige Rolle in Übernahmesituationen spielen kann. Die Befunde bilden eine Ausgangsbasis für die systematische experimentelle Variation dieser übergeordneten Tätigkeitsmerkmale in L3-Übernahmesituationen.

3.4 Studie 2: Übernahmeleistung im hochautomatisierten Fahren in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Anreiz der fahrfremden Tätigkeit

3.4.1 Prüfzenario

Das Prüfzenario dieser Untersuchung glich im Wesentlichen dem von Studie 1. Auch hier handelte es sich bei der untersuchten Systemgrenze um einen Sensorausfall. Allerdings war die Übernahmesituation kritischer gestaltet: Der Sensor fiel diesmal erst während der Kurvendurchfahrt aus und auf der Nachbarfahrspur befand sich gleichauf ein Nebenfahrzeug (Abbildung 14). Während der hochautomatisierten Fahrt wurden die Probanden 6 s vor Erreichen der Systemgrenze durch eine visuell-auditive Übernahmeaufforderung zur manuellen Fahrzeugführung aufgefordert.

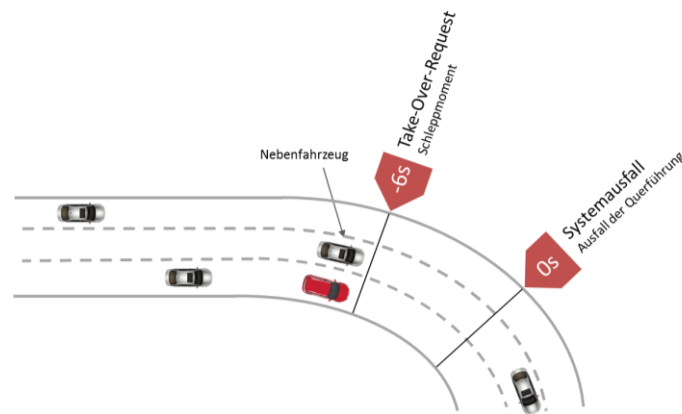


Abbildung 14. Schematische Darstellung der Prüfsituation in Studie 2.

3.4.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)

Bei der verwendeten Mensch-Maschine-Schnittstelle handelte es sich um die Warnstufe 2 aus Studie 1, welche aus einem Warnton (900 Hz, 300 ms) sowie der in Abbildung 15 dargestellten Einblendung im *Head-Up-Display* des Fahrzeugs bestand.

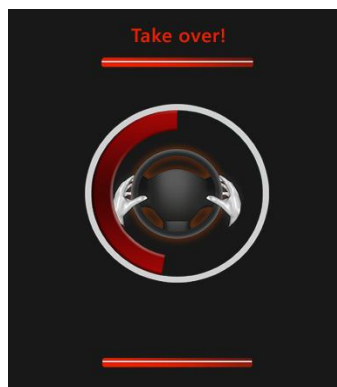


Abbildung 15. Die visuelle Anzeige im *Head-Up-Display* während der Übernahmeaufforderung in Studie 2.

3.4.3 Unabhängige Variablen

3.4.3.1 Anreiz der fahrfremden Tätigkeit

Die erste unabhängige Variable bestand im Anreiz zur Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeiten. Dabei wurde in Studie 2 versucht, zwei sehr ähnliche FFT einzusetzen, welche sich nur im Anreiz der Aufgabebearbeitung unterscheiden sollten. Beide Anwendungen sind in Abbildung 16 (links) dargestellt.

- Bei der motivierenden FFT wurde der Fahrer instruiert, das aus Studie 1 bekannte und allgemein beliebte Geschicklichkeitsspiel Tetris auf einem Tablet zu spielen und vom Versuchsleiter angeregt, eine möglichst hohe Punktzahl zu erreichen.
- Als wenig motivierende Tätigkeit diente ein ebenfalls Tablet basiertes Mal-Spiel für Kleinkinder (Kids Paint Free®) ohne jegliche externe Leistungsanreize. Hierbei konnte der Proband vorgegebene einfache Zeichnungen nach Belieben mit einer Farbpalette ausmalen.

3.4.3.2 Unterbrechungsaufwand

Zusätzlich zum Tätigkeitsanreiz wurde der Unterbrechungsaufwand für die fahrfremden Tätigkeiten gezielt variiert, also die Anzahl der zur Unterbrechung der FFT erforderlichen Handlungsschritte. Wie bereits in Abschnitt 2.2.4.2 erläutert, kann die Manipulation des Unterbrechungsaufwandes im Experiment einerseits durch die Auswahl unterschiedlicher naturalistischer Tätigkeiten erfolgen, welche jeweils von sich aus einen anderen Unterbrechungsaufwand erfordern. Die dadurch sichergestellte Realitätsnähe der Aufgaben bringt die Schwierigkeit mit sich, dass sich diese nie nur in der interessierenden Dimension des Unterbrechungsaufwandes unterscheiden, sondern z. B. auch im Bedienort oder den beteiligten Ressourcen (wie bereits beschrieben eine wesentliche Einschränkung von Studie 1). Um eine maximale Vergleichbarkeit von Bedingungen zu erhalten, sollen in der vorliegenden Studie bei ein und derselben FFT unterschiedliche Unterbrechungsaufwände durch entsprechende Instruktion von Zwischenschritten hergestellt werden:

- Dazu wurden die Fahrer instruiert, beide fahrfremde Tätigkeiten in der Hälfte der Übernahme-situationen lediglich zu pausieren (zentraler Button auf dem Tablet) und wegzulegen (geringer Unterbrechungsaufwand).
- In der anderen Hälfte sollten die Tätigkeiten pausiert, das Tablet in einer geöffneten Box auf dem Beifahrersitz verstaut und die Box mit einem Deckel abgedeckt werden (hoher Unterbrechungsaufwand, vgl. Abbildung 16, rechts).

Der Unterbrechungsaufwand konnte somit unabhängig von den beiden Aufgaben variiert werden.



Abbildung 16. Die beiden Tablet basierten FFT (links) und die Box zum Verstauen des Tablets (inkl. Deckel, rechts) aus Studie 2. Fotos: D. Befelein.

3.4.4 Abhängige Variablen

Auf objektiver Ebene wurde an erster Stelle die Übernahmezeit erfasst, gemessen als die Dauer ab Ausgabe der Übernahmeaufforderung bis zum Ergreifen des Lenkrades durch den Fahrer mit der ersten Hand. Dieses Maß hatte sich in Studie 1 als aussagekräftig und ausreichend für die Berechnung der Übernahmezeit erwiesen. Es war darüber hinaus am besten geeignet für das untersuchte Kurvenszenario, da trotz anderslautender Instruktion manche Fahrer das System durch Übersteuern mit dem Lenkrad deaktivierten (im Sinne eines Mitlenkens in der Kurve), anstatt durch Tastendruck am Lenkrad.

Auch in Studie 2 wurde auf subjektiver Ebene nach jeder erlebten Übernahmesituation zunächst eine Kritikalitätsbeurteilung der Übernahmesituation abgefragt unter Verwendung der Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen nach Neukum et al. (2008) (vgl. Abschnitt 3.3.4.). Zusätzlich wurden im Anschluss an jede Übernahmesituation folgende Fragen gestellt:

- "Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung?"
- "Wie gut haben Sie die Übernahmesituation gelöst?"

Beide Fragen konnten die Fahrer auf einer 16-stufigen Likert-Skala von 0 ("gar nicht [hilfreich / gut gelöst]") bis 15 ("sehr [hilfreich / gut gelöst]") beantworten. Zur Überprüfung der Manipulationen und zur Gewinnung weiterer Erkenntnisse wurden die Probanden im Anschluss an die Testfahrt zusätzlich gebeten, mit Blick auf die beiden fahrfremden Tätigkeiten den Grad ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen auf einer 7-stufigen Skala von 0 („stimme gar nicht zu“) bis 6 („stimme voll zu“) anzugeben:

- „Das Ausführen der Tätigkeit während der Fahrt kann zu gefährlichen Situationen führen.“
- „Die Tätigkeit hat mich unterfordert.“
- „Ich war in die Tätigkeit versunken.“
- „Die Tätigkeit war anstrengend.“
- „Die Tätigkeit war aufwändig zu unterbrechen.“

- „Die Tätigkeit hat mir Spaß gemacht.“

Sämtliche abhängigen Variablen von Studie 2 sind zusammenfassend in Tabelle 7 dargestellt.

	Name	Erfassung	Einheit
Objektive Variablen	Zeit bis zum Ergreifen des Lenkrads	Simulatorsystem (Sensoren)	[s]
Subjektive Variablen	Kritikalitätsbewertung	Skala nach Neukum et al. (2008)	Skalenpunkte [0...10]
	Bewertung der Übernahmesituation	„Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung?“ „Wie gut haben Sie die Übernahmesituation gelöst?“	Skalenpunkte [0...15]
	Bewertung der fahrfremden Tätigkeiten	„Das Ausführen der Tätigkeit während der Fahrt kann zu gefährlichen Situationen führen.“ „Die Tätigkeit hat mich unterfordert.“ „Ich war in die Tätigkeit versunken.“ „Die Tätigkeit war anstrengend.“ „Die Tätigkeit war aufwändig zu unterbrechen.“ „Die Tätigkeit hat mir Spaß gemacht.“	Skalenpunkte [0...6]

Tabelle 7. Abhängige Variablen in Studie 2.

3.4.5 Versuchsplan

Bei der vorliegenden Studie handelte es sich um ein komplettes *within*-Design: Jeder Proband erlebte (zusätzlich zur Baseline ohne FFT) alle vier Kombinationen aus Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand. Dabei wurden zwei Blöcke unterschieden: In Block 1 war das Mal-Spiel einmal mit hohem und anschließend einmal mit geringem Unterbrechungsaufwand bei der Übernahme zu durchlaufen. In Block 2 erfolgte derselbe Ablauf mit dem Tetris-Spiel. Insgesamt erlebte jeder Proband somit fünf Übernahmesituationen. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurde die Abfolge von Block 1, Block 2 und der Baseline-Messung permutiert.

3.4.6 Versuchsablauf

Die Vorbereitung der Probanden auf die Testfahrt in Studie 2 glich im grundlegenden Ablauf der von Studie 1. Allerdings wurden zusätzlich die beiden Unterbrechungs-Varianten (in Box verstauen mit Deckel bzw.

Weglegen auf den Beifahrersitz) in mehreren Durchgängen eingeübt, bis die Teilnehmer den jeweiligen Ablauf beherrschten. In der Hauptfahrt sollten die Probanden zunächst das System aktivieren und (sofern sie nicht mit der Baseline-Bedingung starteten) der ersten der beiden fahrfremden Tätigkeiten nachgehen. An dieser Stelle erfuhren die Fahrer, welche Unterbrechungsvariante im Falle einer möglichen Übernahmeaufforderung auszuführen sei. Sie wussten somit im Voraus, ob bei einer Übernahmeaufforderung das Tablet in der Box zu verstauen oder schlicht auf den Beifahrersitz zu legen sein würde. Nach etwa 3 min HAF-Fahrt wurde die erste Systemgrenze erreicht und die Übernahmeaufforderung ausgegeben. Nach der Übernahmeprozedur folgten zunächst etwa 30 Sekunden manuellen Fahrens, bis das System die HAF-Fahrt wieder freigab. Die Fahrer aktivierten das L3-System wieder und es fand die bereits in Abschnitt 3.3.4 beschriebene subjektive Befragung statt. Im Anschluss wurde die nächste fahrfremde Tätigkeit instruiert. Die Dauer der HAF-Abschnitte blieb konstant, um einen Einfluss dieses Faktors auf die Übernahmekriterien zu verhindern. Es wurden jedoch mehrere Maßnahmen ergriffen, um die Vorhersagbarkeit der Übernahmesituationen zu verringern. So waren z. B. an unterschiedlichen Stellen der Strecke abseits der Prüfsituation vorübergehend Vorderfahrzeuge mit etwas geringeren Geschwindigkeiten platziert, um Abwechslung in die Fahrt zu bringen. Darüber hinaus durchfuhren Probanden das Übernahmeszenario mehrere Male, ohne dass eine Übernahmesituation stattfand. Nach der Hauptfahrt füllten die Teilnehmer den ebenfalls in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Nachbefragungsbogen aus, wurden für ihre Versuchsteilnahme entschädigt und verabschiedet. Insgesamt dauerte der Versuch ca. 45-60 min.

3.4.7 Ausschluss von Daten

Von der Analyse wurden einzelne Übernahmesituationen ausgeschlossen, wenn:

- ein Proband im Moment der Ausgabe der Übernahmeaufforderung nicht mit der Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeit beschäftigt war ($n = 2$). Gründe hierfür waren u. a. technische Probleme mit dem Tablet oder die Ausgabe der Übernahmeaufforderung während des Ladens eines neuen Tetris-Spiels (aufgrund vorherigem Game-Over),
- ein Proband das Tetris-Spiel am Tablet erst nach Ergreifen des Lenkrades oder gar nicht pausierte ($n = 3$).

Darüber hinaus musste ein Proband wegen Schwierigkeiten im Verständnis der Instruktionen und im Umgang mit dem Tablet komplett von der Analyse ausgeschlossen werden. In einer Übernahmesituation kam es dazu, dass der Proband es versäumte, in einer Bedingung mit hohem Unterbrechungsaufwand die Box, wie instruiert, mit dem Deckel zu schließen. Darüber hinaus wurde vereinzelt das Tablet entgegen der Aufgabenstellung nicht in die Box sondern lediglich weggelegt ($n = 4$). In beiden beschriebenen Konstellationen wurde die jeweilige Situation als „Weglegen“ betrachtet, d. h. der Unterbrechungsaufwand als „gering“ kodiert.

3.4.8 Ergebnisse

3.4.8.1 Objektive Daten

Abbildung 17 zeigt die mittlere Dauer ab Ausgabe der Übernahmeaufforderung bis zum Ergreifen des Lenkrades durch die Fahrer (sog. Hands-On-Zeit⁵), in Abhängigkeit von fahrfremder Tätigkeit und Unterbrechungsaufwand. Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten sind in Tabelle 8 dargestellt:

- **Haupteffekt Unterbrechungsaufwand.** Tätigkeiten mit hohem Unterbrechungsaufwand führen bei beiden Spielen zu signifikant späterem Ergreifen des Lenkrades gegenüber Tätigkeiten mit geringem Unterbrechungsaufwand ($F(1, 81) = 54.87; p < .001, \eta^2 = .40$).
- **Kein Einfluss der FFT.** Die Hands-On-Zeiten der beiden fahrfremden Tätigkeiten unterschieden sich nicht signifikant voneinander ($F(1, 81) = .001; p = .976, \eta^2 = .00$).
- **Interaktion zwischen Unterbrechungsaufwand und FFT.** Im Tetris-Spiel zeigten sich deutlich größere Zeitunterschiede zwischen den beiden Unterbrechungsvarianten als im Mal-Spiel: Die Zeitdifferenzen betragen 1.7 s (Mal-Spiel) bzw. 3 s (Tetris). Diese Interaktion wurde signifikant ($F(1, 81) = 4.15; p = .045, \eta^2 = .05$).

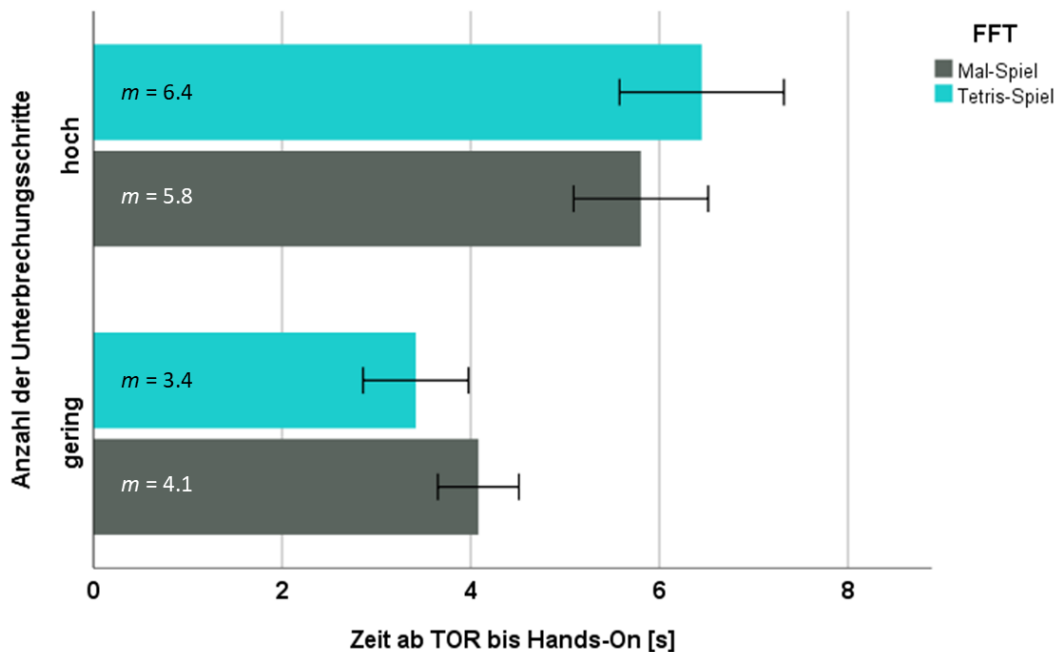


Abbildung 17. Einfluss des Unterbrechungsaufwandes und der Art der FFT auf Hands-On-Zeiten (Fehlerbalcken: 95%-Konfidenzintervalle).

⁵ An dieser Stelle werden Hands-On-Zeiten berichtet, da in einigen Fällen keine Systemdeaktivierung per Tastendruck durch die Probanden stattfand.

FFT	Unterbrechungsaufwand	
	gering	hoch
Mal-App	4.1 (1.0)	5.8 (1.6)
Tetris	3.4 (1.2)	6.4 (2.0)

Tabelle 8. Mittlere Hands-On-Zeiten in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Art der FFT (Standardabweichungen in Klammern). Referenzwerte Baseline: 1.2 (0.4).

3.4.8.2 Subjektive Daten

Abbildung 18 zeigt die mittleren Kritikalitätsurteile der Probanden in Abhängigkeit der Unterbrechungsvariante. Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Bewertungen sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Kritikalität wurde auch in dieser Studie stets direkt im Anschluss an die jeweilige Übernahmesituation erfragt.

- **Kritischere Bewertung der Situationen bei FFT mit hohem Unterbrechungsaufwand.** Bei hohem Unterbrechungsaufwand wurden die Situationen als kritischer bewertet als bei geringem Unterbrechungsaufwand ($t(22) = -7.40, p < .001$).
- **Die beiden Spiele unterschieden sich in diesem Maß nicht signifikant voneinander** ($t(22) = -.352, p < .728$).

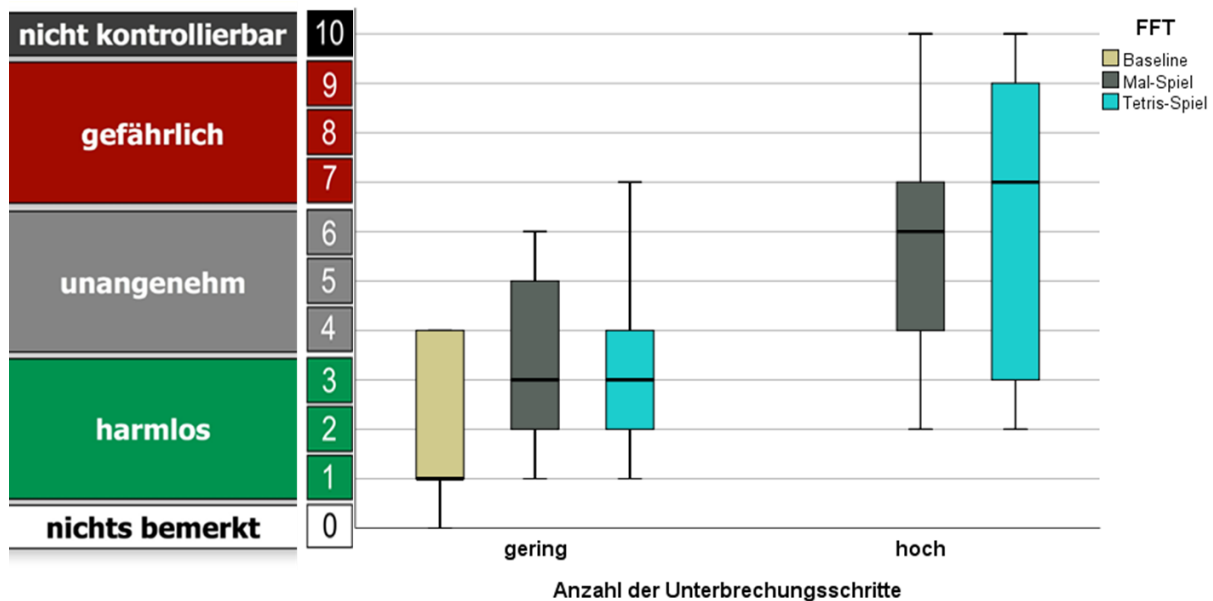


Abbildung 18. Einfluss des Unterbrechungsaufwandes auf Kritikalitätsurteile auf der Skala nach Neukum et al. (2008). Die Bewertungen wurden jeweils direkt nach den Prüfsituationen abgefragt.

FFT	Unterbrechungsaufwand	
	gering	hoch
Mal-App	3.5 (1.6)	5.6 (2.3)
Tetris	3.3 (1.6)	6.1 (2.9)

Tabelle 9. Mittelwerte der Kritikalitätsbewertung auf der Skala nach Neukum et al. (2008) in Abhängigkeit der während der Übernahmeaufforderung ausgeführten fahrfremden Tätigkeiten (Standardabweichungen in Klammern). Referenzwerte Baseline: 1.9 (1.5).

Abbildung 19 zeigt die mittleren subjektiven Bewertungen des Tetris- und Mal-Spiels durch die Probanden. Die Fragen wurden jeweils direkt im Anschluss an den Versuch im Rahmen einer Nachbefragung gestellt. Dabei zeigten sich folgende signifikante Unterschiede (vgl. Tabelle 10):

- Das Tetris-Spiel wurde als **spaßbringender** bewertet als das Mal-Spiel.
- Die Probanden empfanden das Tetris-Spiel als **aufwändiger zu unterbrechen** als das Mal-Spiel.
- Das Tetris-Spiel wurde darüber hinaus als **anstrengender** beurteilt als das Mal-Spiel,
- Die Probanden gaben an, deutlich **stärker** in das Tetris-Spiel **versunken** zu sein als in das Mal-Spiel.
- Das Tetris-Spiel wurde von den Probanden als **gefährlicher** im Hinblick auf eine mögliche Vernachlässigung der Fahraufgabe bewertet als das Mal-Spiel.

Insgesamt betrachtet, fielen die Unterschiede in den Bewertungen zwischen beiden Tätigkeiten jedoch geringer aus als erwartet: Es traten keine stark gegensätzlichen Bewertungen auf.

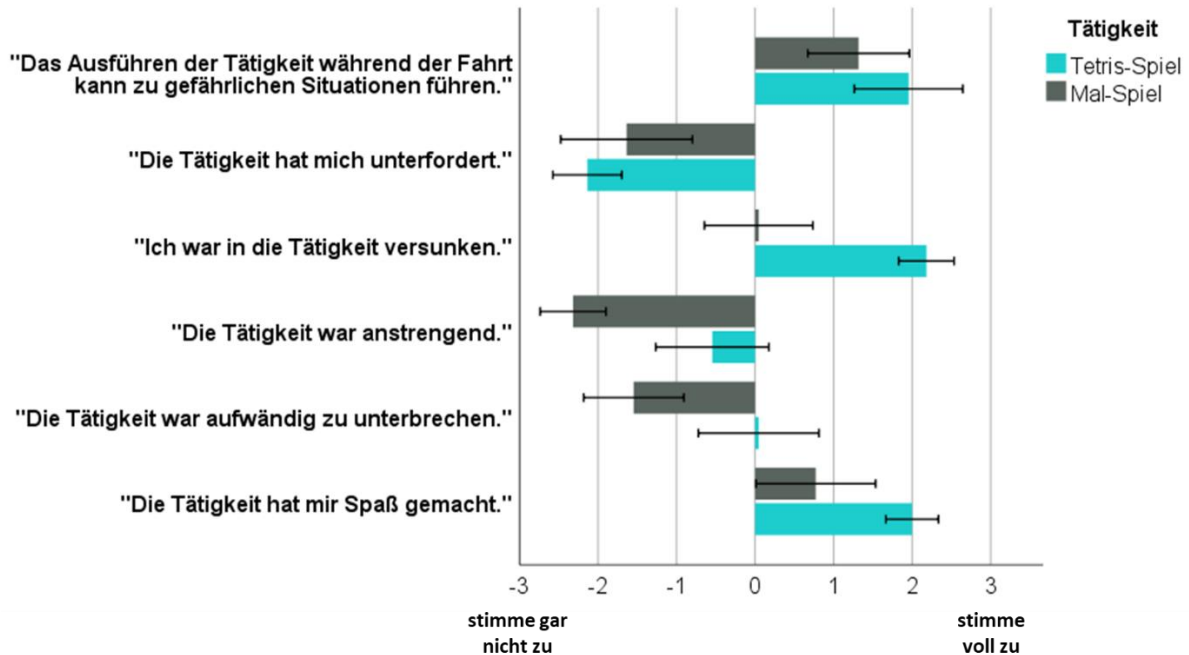


Abbildung 19. Abschließende subjektive Bewertungen der beiden fahrfremden Tätigkeiten aus Studie 2 (Abfrage im Anschluss an den Versuch). Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle.

	Tetris-Spiel	Mal-Spiel	Teststatistik
„Das Ausführen der Tätigkeit während der Fahrt kann zu gefährlichen Situationen führen.“	2.0 (1.6)	1.3 (1.5)	$t(21) = 2.63, p = .016$
„Die Tätigkeit hat mich unterfordert.“	-2.1 (1.0)	-1.6 (1.9)	$t(21) = -1.09, p < .289$
„Ich war in die Tätigkeit versunken.“	2.2 (0.8)	0.0 (1.6)	$t(21) = 7.59, p < .001$
„Die Tätigkeit war anstrengend.“	-0.5 (1.6)	-2.3 (0.9)	$t(21) = 5.40, p < .001$
„Die Tätigkeit war aufwändig zu unterbrechen.“	0.0 (1.7)	-1.5 (1.4)	$t(21) = 4.05, p = .001$
„Die Tätigkeit hat mir Spaß gemacht.“	2.0 (0.8)	0.8 (1.7)	$t(21) = 3.41, p = .003$

Tabelle 10. Mittlere Beurteilungen der beiden fahrfremden Tätigkeiten auf einer Skala von -3 „stimme gar nicht zu“ bis 3 „stimme voll zu“ (Standardabweichungen in Klammern) sowie dazugehörige Teststatistiken.

3.4.8.3 Verhaltensbeobachtungen

Es konnte durchgehend beobachtet werden, dass Probanden während der Ausübung fahrfremder Tätigkeiten Ihre Aufmerksamkeit vollständig den Aufgaben widmeten und nahezu keine Kontrollblicke auf die Straße stattfanden. Es kann somit von einem sehr hohen Systemvertrauen ausgegangen werden. Übungseffekte hinsichtlich des exakten Zeitpunktes der Übernahmeaufforderungen sind nicht anzunehmen.

3.4.9 Zwischenfazit und Diskussion

Ziel von Studie 2 war die systematische Variation des Unterbrechungsaufwandes und des Bearbeitungsanreizes fahrfremder Tätigkeiten bei größtmöglicher experimenteller Kontrolle der Rahmenbedingungen, um den Einfluss beider Variablen auf die Übernahmeleistung des Fahrers im hochautomatisierten Fahren zu untersuchen. Der Einfluss des Unterbrechungsaufwandes auf objektive wie auf subjektive Parameter konnte deutlich gezeigt werden und repliziert damit die Ergebnisse von Befelein et al. (2018): Die Anzahl der zur Unterbrechung der FFT erforderlichen Handlungsschritte wirkte sich bei beiden untersuchten Aufgaben stark auf die Übernahmezeiten sowie auf die Kritikalitätsurteile aus. Dieser Befund erscheint höchstens auf den ersten Blick trivial. Schließlich wäre es ebenso denkbar gewesen, dass Fahrer Unterschiede im instruierten Unterbrechungsaufwand z. B. durch früheres oder rascheres Handeln kompensieren. Dass dies nicht der Fall war, unterstreicht die Bedeutung des Unterbrechungsaufwandes fahrfremder Tätigkeiten in Übernahmesituationen. Insbesondere bei unter Realbedingungen zu erwartenden natürlichen fahrfremden Tätigkeiten ist in diesem Zusammenhang mit relevanten Reaktionszeitunterschieden zu rechnen.

Die beiden Aufgaben „Tetris-Spiel“ und „Mal-Spiel“ wurden im Hinblick auf unterschiedliche Bearbeitungsanreize ausgesucht. Ziel war es, eine stark intrinsisch motivierende Tätigkeit (Tetris) und eine generell wenig motivierende Tätigkeit (Mal-Spiel) auf identischen Tablets anzubieten, wobei die Handhabung der Spiele ebenfalls nahezu identisch war. Allerdings ist mit Blick auf die Ergebnisse fraglich, ob die Bearbeitungsanreize der beiden Tätigkeiten sich tatsächlich ausreichend unterschieden. Die in Abbildung 19 dargestellten Resultate der Nachbefragung zu den beiden Tätigkeiten deuten darauf hin, dass zwar Unterschiede zwischen den FFT vorliegen - allerdings sind diese meist kleiner als beabsichtigt. Insgesamt betrachtet, scheint der Bearbeitungsanreiz des Mal-Spiels lediglich geringer gewesen zu sein als der des Tetris-Spiels; denn auch das Malen wurde als spaßbringend und einigermaßen fordernd bewertet. Es stellt somit nicht, wie beabsichtigt, eine anreizarme Tätigkeit dar. Dass ein Einfluss des Anreizes zur Weiterbearbeitung der FFT auf die Übernahmeleistung in Studie 2 nicht gezeigt werden konnte, ist demnach vermutlich darauf zurückzuführen, dass sich die beiden Tätigkeiten trotz aller Unterschiede noch zu ähnlich waren in ihrem Potenzial, den Fahrer zur (Weiter-)Bearbeitung zu motivieren. In den beiden folgenden Studien wird deshalb auf eine andere Variation des Bearbeitungsanreizes zurückgegriffen.

3.5 Studie 3: Adaptive Transitionskonzepte als Mittel zur Vermeidung unerwünschter Habituationseffekte des Fahrers in Übernahmesituationen

Im Vordergrund von Studie 3 standen adaptive Transitionskonzepte und deren Eignung, unerwünschte Habituationseffekte des Fahrers in Übernahmesituationen während hochautomatisierter Fahrt zu verringern. Durch eine entsprechende Versuchsanordnung wurden Systeme mit invariablen Übernahmeaufforderungen mit einem System verglichen, dessen Übernahmeaufforderungen sich variabel nach dem Anreiz und dem Unterbrechungsaufwand der jeweiligen fahrfremden Tätigkeit richteten.

3.5.1 Prüfzenario

Bei der in Studie 3 untersuchten Systemgrenze handelte es sich um ein Pannenfahrzeug auf der eigenen Fahrspur. Dieses Prüfzenario wurde gewählt, da es einerseits eine komplexere Fahrerreaktion (Absicherung nach links und Spurwechsel) erfordert als das Kurvenszenario aus Studie 2 und sich andererseits in der Literatur weitgehend etabliert hat (z. B. Gold, Happee & Bengler, 2017; Wandtner et al., 2018; Wiedemann et al., 2018), was die Vergleichbarkeit von Ergebnissen erleichtert. Das Fahrzeug des Probanden fuhr dabei automatisiert auf der rechten Spur einer 3-spurigen Autobahn geradeaus bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h und folgte einem Vorderfahrzeug. An einem bestimmten Streckenpunkt wechselte das Vorderfahrzeug auf die mittlere Fahrspur und gab die Sicht auf das Pannenfahrzeug frei. Im selben Moment wurde eine visuell-auditive Übernahmeaufforderung ausgegeben. Das Probandenfahrzeug ging an dieser Stelle ins Schlepplmoment (Abschaltung der Längsführung). Bei ausbleibender Fahrerreaktion wäre es nach ca. 8 s zu einer Kollision mit dem Pannenfahrzeug gekommen (TTC bei TOR Ausgabe = 8 s). Dies konnte vom Probanden durch Deaktivierung des Systems und einen anschließenden Spurwechsel auf die mittlere Fahrspur verhindert werden. Um eine Vergleichbarkeit der Situationsanforderungen an den Fahrer zu gewährleisten, war die mittlere Fahrspur in den Übernahmesituationen immer frei.

3.5.2 Unabhängige Variablen

3.5.2.1 Anreiz der fahrfremden Tätigkeit

Die erste unabhängige Variable in Studienteil 1 bestand erneut in unterschiedlichen Anreizen zur Bearbeitung der fahrfremden Tätigkeiten. Zur Variation des Tätigkeitsanreizes wurde in Studie 3 ein anderer Weg beschritten als in Studie 2. Die Wahrnehmung der Merkmale von Tetris- und Mal-Spiel fiel in Studie 2 für eine wirksame Manipulation zu ähnlich aus (insbesondere hinsichtlich des Anreizes der Tätigkeiten). Deshalb wurde in Studie 3 ausschließlich das Tetris-Spiel verwendet und stattdessen versucht, *within* unterschiedliche Fahrermotivationen zur Weiterbearbeitung über externe Anreize zu erzeugen:

- In Spieldurchgängen mit hohem beabsichtigten Tätigkeitsanreiz wurde den Probanden der Punktestand im Tetris-Spiel angezeigt. Der Versuchsleiter spornte die Probanden darüber hinaus an, eine möglichst hohe Punktzahl zu erreichen und eine finanzielle Prämie für die erzielten Punkte wurde

in Aussicht gestellt. Bei Erreichen eines jeweils höheren Levels im Spiel erklang im Fahrzeug ein kurzes „Kassenklingeln“. Zusätzlich wurde ein kleiner Preis für den Punktesieger der Studie in Aussicht gestellt.

- In Spieldurchgängen mit geringem beabsichtigten Tätigkeitsanreiz wurde entsprechend kein Punktestand angezeigt, das Spielen vom Versuchsleiter für den jeweiligen Durchgang als belanglose Beschäftigung bezeichnet und weder das Klingeln dargeboten noch finanzielle Prämien ausgelobt.

3.5.2.2 Unterbrechungsaufwand

Als weitere unabhängige Variable wurde der Unterbrechungsaufwand der fahrfremden Tätigkeiten wie bereits in Studie 2 gezielt variiert, ebenfalls als *within*-Faktor (vgl. Abschnitt 3.4.3).

3.5.2.3 Transitionskonzept

Als dritte unabhängige Variable kamen schließlich drei unterschiedliche Transitionskonzepte zum Einsatz, welche zwischen den einzelnen Probanden abwechselten (*between*): Ein Teil der Probanden erhielt stets identische, hoch dringliche Warnungen in allen acht Übernahmesituationen, bestehend aus einem Warnton, einer Übernahme-Anzeige im *Head-Up-Display* sowie der Sprachausgabe „Achtung! Sofort übernehmen!“ (Konzept 1). Ein weiterer Teil der Probanden erhielt stets identische, wenig dringliche Warnungen in allen acht Übernahmesituationen, bestehend aus einem Gong, einer Übernahme-Anzeige im *Head-Up-Display* sowie der Sprachausgabe „Demnächst Kontrolle übernehmen“ (Konzept 2). Ein dritter Teil der Probanden erhielt schließlich variable Warnungen: In Situation 1 wurde die beschriebene hoch dringliche Warnung, in den sechs darauffolgenden Situationen die beschriebene gering dringliche Warnung und in Situation 8 wieder die hoch dringliche Variante ausgegeben (Konzept 3). Die Dringlichkeit der Warnung war Probanden in Konzept 3 somit angepasst an den jeweiligen Anreiz und den Unterbrechungsaufwand der fahrfremden Tätigkeit: Bei hohem Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand wurde eine Übernahmeaufforderung mit hoher Dringlichkeit ausgegeben, während bei geringem Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand eine Übernahmeaufforderung mit geringer Dringlichkeit ausgegeben wurde. Die beiden Übernahmeaufforderungen sind schematisch in Abbildung 20 dargestellt. Abbildung 21 zeigt zusammenfassend die unabhängigen Variablen Tätigkeitsanreiz, Unterbrechungsaufwand und Transitionskonzept.

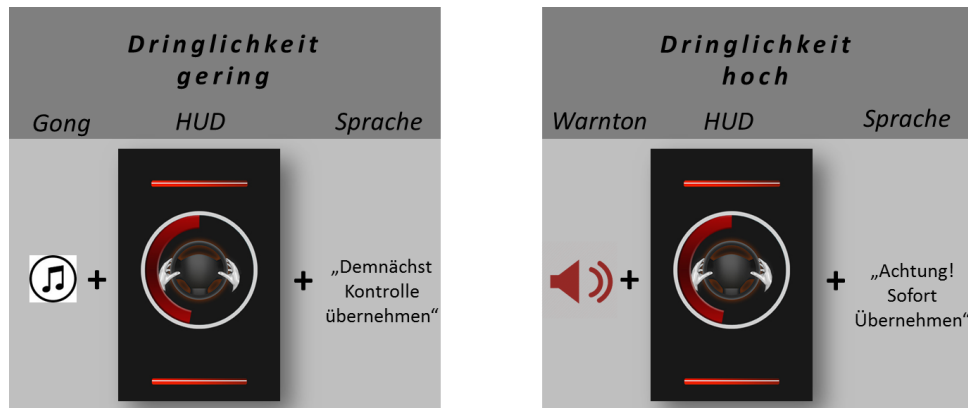


Abbildung 20. Veranschaulichung der Übernahmeaufforderung mit geringer (links) und hoher Dringlichkeit (rechts).

3.5.3 Abhängige Variablen

Auf objektiver Ebene wurde die Zeit zwischen Ausgabe der Übernahmeaufforderung und der jeweils ersten der drei folgenden Fahrerreaktionen erfasst: Deaktivierung des Systems durch Bremsen, Deaktivierung des Systems durch beidseitigen Tastendruck am Lenkrad oder Deaktivierung des Systems durch Lenken (Lenkradwinkel $> 2^\circ$).

Auf subjektiver Ebene wurde wie bereits in Studie 2 nach jeder erlebten Übernahmesituation zunächst eine Kritikalitätsbeurteilung der Übernahmesituation abgefragt, unter Verwendung der Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen nach Neukum, Lübbecke, Krüger, Mayser, and Steinle (2008), vgl. Abschnitt 3.3.4. Auch sollten die Probanden im Anschluss an jede Übernahmesituation wieder die folgenden Fragen beantworten:

- "Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung?"
- "Wie gut haben Sie die Übernahmesituation gelöst?"

Beide Fragen konnten auf einer 16-stufigen Likert-Skala von 0 ("gar nicht [hilfreich / gut gelöst]") bis 15 ("sehr [hilfreich / gut gelöst]") beantwortet werden. Um u. a. den Erfolg der Anreiz-Manipulation direkt zu erfassen, wurden den Probanden im Anschluss an die Testfahrt folgende Fragen zu den fahrfremden Tätigkeiten gestellt:

- „Wie ausgeprägt war Ihre Motivation, Tetris zu spielen?“
- „Wie schwer ist es ihnen gefallen, das Tetris-Spiel zu unterbrechen?“
- „Für wie gefährlich halten Sie das Tetris-Spielen während einer realen, hochautomatisierten Autobahnfahrt?“

Die Antworten mussten getrennt für die beiden Anreizbedingungen gegeben werden. Dabei wurde ebenfalls eine 16-stufige Likert-Skala eingesetzt, welche von 0 („gar nicht“) bis 15 („sehr stark“) reichte. Zusätzlich wurde – ebenfalls getrennt für beide Anreizbedingungen – die Bedienbarkeit des Systems mit Hilfe der *System Usability Scale* (Brooke, 1996) sowie die Nutzerakzeptanz mit Hilfe der *System Acceptance Scale* (Van der Laan, Heino & De Waard, 1997) erfasst. Sämtliche abhängigen Variablen von Studie 3 sind zusammenfassend in Tabelle 11 dargestellt.

	Name	Erfassung	Einheit
Objektive Variablen	Zeit bis Bremsen	Simulatorsystem	[s]
	Zeit bis Tastendruck am Lenkrad	Simulatorsystem	[s]
Subjektive Variablen	Kritikalitätsbewertung	Skala nach Neukum et al. (2008)	Skalenpunkte [0...10]
	Bewertung der Übernahmesituation	„Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung?“ „Wie gut haben Sie die Übernahmesituation gelöst?“	Skalenpunkte [0...15]
	Bewertung der fahrfremden Tätigkeiten	„Wie ausgeprägt war Ihre Motivation, Tetris zu spielen?“ „Wie schwer ist es ihnen gefallen, das Tetris-Spiel zu unterbrechen?“ „Für wie gefährlich halten Sie das Tetris-Spielen während einer realen, hochautomatisierten Autobahnfahrt?“	Skalenpunkte [-3...3]
	Systembedienbarkeit	System Usability Scale (SUS) nach Brooke (1996)	Skalenpunkte [-2...2]
	Systemakzeptanz	System Acceptance Scale nach Van der Laan et al. (1997)	Skalenpunkte [-2...2]

Tabelle 11. Abhängige Variablen in Studie 3.

3.5.4 Versuchsplan

Bei Studie 3 handelte es sich um ein *between-within*-Design. Die beiden unabhängigen Variablen „Tätigkeitsanreiz“ und „Unterbrechungsaufwand“ wurden *within* über die verschiedenen Übernahmesituationen hinweg manipuliert. Jeder Proband erlebte insgesamt acht Übernahmesituationen. Vor den Situationen 1

und 8 fanden jeweils Spieldurchgänge mit hohem Tätigkeitsanreiz und hohem Unterbrechungsaufwand statt. Vor den Übernahme-situationen 2 bis 7 hingegen waren Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand gering. Die dritte unabhängige Variable „Transitions-konzept“ wurde indessen *between*, d. h. zwischen den Probanden variiert: Sie erlebten jeweils ein Transitions-konzept.

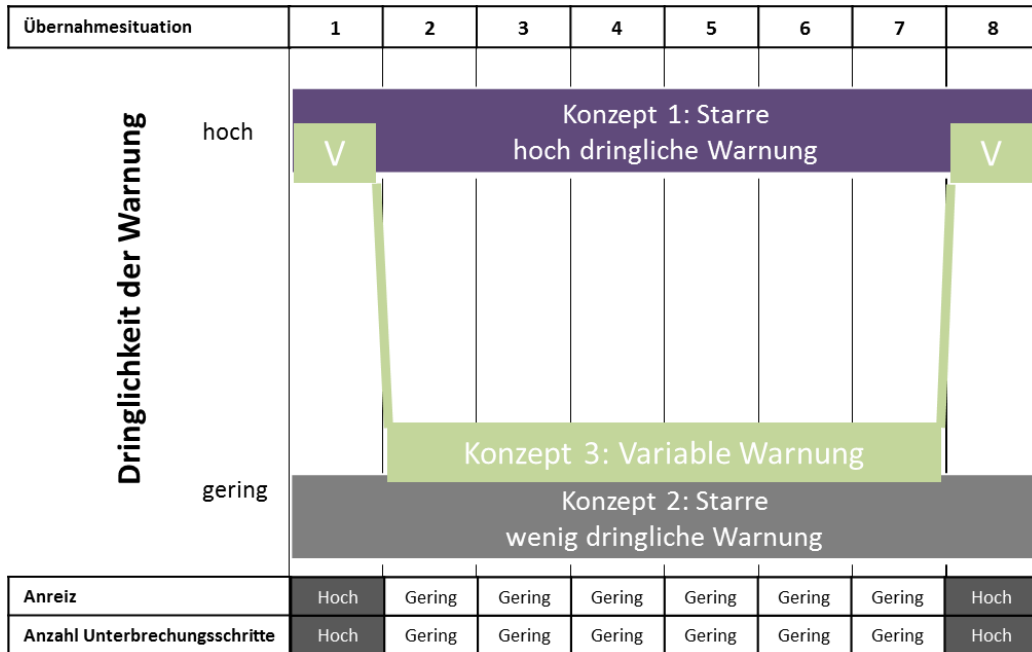


Abbildung 21. Schematische Darstellung der über 8 Übernahme-situationen hinweg variierten 2-stufigen *within*-Faktoren Anreiz und Unterbrechungsaufwand sowie des 3-stufigen *between*-Faktors Transitions-konzept.

3.5.5 Versuchsablauf

Die Vorbereitung der Probanden auf die Testfahrt in Studie 3 glich im grundlegenden Ablauf der aus den Studien 1 und 2. Die Teilnehmer übten die Unterbrechungs-Varianten auch hier in mehreren Durchgängen ein, bis sie den jeweiligen Ablauf beherrschten. In der Hauptfahrt aktivierten die Probanden zunächst das System und gingen dann der fahrfremden Tätigkeit nach. Ganz zu Beginn der Fahrt sowie nach jeder Übernahme-situation erhielten sie die jeweilige Instruktion, welche Unterbrechungsvariante im Falle einer möglichen Übernahmeaufforderung auszuführen sei. Nach etwa 3 min HAF-Fahrt wurde die erste Systemgrenze erreicht und die Übernahmeaufforderung ausgegeben. Nach der Übernahme-prozedur folgten wie in den vorangegangenen Studien zunächst etwa 30 Sekunden manuellen Fahrens, bis eine Aktivierung des Systems wieder möglich war. Die Fahrer reaktivierten das L3-System und es fand die in Abschnitt 3.5.3 beschriebene subjektive Befragung statt. Darauf folgte die nächste fahrfremde Tätigkeit instruiert und so fort. Jeder Proband erlebte über die acht Übernahme-situationen hinweg die gleiche feste Abfolge aus Merkmalskombinationen fahrfremder Tätigkeiten: Die jeweils erste Situation enthielt einen hohen Unterbrechungsaufwand

(Tablet musste in der Box verstaut werden) und hohen Tätigkeitsanreiz (Punkte und Geld für das Tetris-Spiel). Es folgten sechs Übernahme-situationen mit geringem Unterbrechungsaufwand und geringem Tätigkeitsanreiz. Die letzte Übernahme-situation wurde hingegen erneut mit hohem Unterbrechungsaufwand und hohem Tätigkeitsanreiz dargeboten. Auch in Studie 3 gab es nach der Hauptfahrt einen Nachbefragungsbogen für die Probanden (vgl. Abschnitt 3.5.3). Die Probanden füllten diesen aus, wurden für ihre Versuchsteilnahme entlohnt und verabschiedet. Insgesamt dauerte die Teilnahme an Studie 3 ca. 45-60 min.

3.5.6 Hypothesen

Mit Blick auf die Übernahmezeiten wurde angenommen, dass die invariablen Warnungen über die Übernahme-situationen hinweg aufgrund ihres mangelnden Zusammenhangs mit den Rahmenbedingungen (d. h. stets identische Übernahmeaufforderungen unabhängig von Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand) rasch an Wirkung verlieren würden. Die Übernahme-situation 8 stellt gewissermaßen den ungünstigsten Fall dar, bei dem nach mehreren Durchgängen mit potenzieller Adaptation der Probanden an die Übernahmeaufforderungen wieder ein hoher Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand vorliegen und die Übernahmebedingungen folglich besonders kritisch sind. Sowohl für die invariabel hoch dringlichen als auch für die invariabel wenig dringlichen Übernahmeaufforderungen wurden hier erhöhte Übernahmezeiten erwartet. Für das variable Transitionskonzept wurde hingegen angenommen, dass die Warnungen über die Übernahme-situationen hinweg durch ihre Relation zu den Rahmenbedingungen (d. h. dringliche Übernahmeaufforderung bei hohem Anreiz und hohem Unterbrechungsaufwand et vice versa) ihre Wirkung über die Wiederholungsdurchgänge hinweg behalten würden. Gleichzeitig bestand für diese Fälle die Annahme, dass Fahrer die für die Übernahme zur Verfügung stehende Zeit effizienter für eine Weiterbearbeitung der fahrfremden Tätigkeit nutzen würden, ohne dass dadurch ihre Leistung bei der Übernahme beeinträchtigt wäre. Entsprechend wurden für das variable Konzept in allen Übernahme-situationen, insbesondere in Situation 8, moderate Übernahmezeiten erwartet.

Auf subjektiver Ebene bestand die Erwartung, dass Probanden die Adaptivität des variablen Übergabekonzeptes positiv aufnehmen sowie als Informationsquelle für eine effiziente Unterbrechung fahrfremder Tätigkeit nutzen und entsprechend höhere Akzeptanzratings für dieses Transitionskonzept vergeben würden als für die invariablen Varianten.

3.5.7 Ausschluss von Daten

Eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse von Studie 3 setzt voraus, dass nur Probanden in die Analyse eingehen, welche die jeweilige Sequenz aus Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand exakt wie vorgesehen durchlaufen haben. Von der Analyse ausgeschlossen wurden $n = 9$ Probanden, welche das Verstauen des Tablets in der Box nicht oder unvollständig ausführten, $n = 2$ Probanden, welche das Tablet-Spiel erst

nach der Übernahme oder gar nicht pausierten sowie $n = 3$ Probanden aufgrund Problemen seitens der Technik oder der Versuchsleitung. Insgesamt gingen somit $n = 44$ Probanden in die Analyse ein.

3.5.8 Ergebnisse

3.5.8.1 Objektive Daten

Die Reaktionszeiten auf die Übernahmeaufforderungen sind in Abbildung 22 abgebildet. Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten sind in Tabelle 12 dargestellt. Dabei zeigten sich drei Hauptbefunde:

- **Sehr unterschiedliche Übernahmezeiten im hoch dringlichen Transitionskonzept.** Abbildung 22 veranschaulicht die mittleren Zeitdauern bis zur ersten Fahrerreaktion. Hierbei zeigte sich ein genereller Haupteffekt der Übernahmesituation ($F(7, 84) = 11.64; p < .001; \eta^2 = .49$). Die invariablen, hoch dringlichen Übernahmeaufforderungen (Abbildung 22, oben) gingen mit Übernahmezeiten einher, die deutlich die *within*-Faktoren Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand widerspiegeln. Während die Zeiten in den Situationen 1 ($m = 5.5$) und 8 ($m = 5.3$) – d. h. jeweils bei hohem Tätigkeitsanreiz und einer hohen Anzahl von Unterbrechungsschritten - im Mittel relativ lang waren, wurde z. B. in Situation 2 signifikant früher übernommen als in Situation 1 ($F(1, 12) = 19.88; p = .001; \eta^2 = .62$) und in Situation 7 signifikant früher als in Situation 8 ($F(1, 12) = 27.21; p < .001; \eta^2 = .69$). Ein beträchtlicher Anteil der für die Weiterbearbeitung der fahrfremden Tätigkeit zur Verfügung stehenden Zeit wurde in den Situationen 2 bis 7 somit nicht genutzt.
- **Generell verzögerte Übernahmen im wenig dringlichen Konzept.** In der Gruppe mit invariablen, wenig dringlichen Übernahmeaufforderungen (Abbildung 22, Mitte) verschob sich das vorangegangene Muster im Prinzip lediglich um 1 bis 2 s nach oben. Die Übernahme erfolgte hier in allen Situationen später, und entsprechend wurde ein größerer Anteil der zur Weiterbearbeitung der fahrfremden Tätigkeit zur Verfügung stehenden Zeit genutzt. Dieser Effekt hatte allerdings den Preis höherer Übernahmezeiten in den Situationen 1 und 8. Auch im wenig dringlichen Konzept zeigte sich ein genereller Haupteffekt der Übernahmesituation ($F(7, 119) = 33.93; p < .001; \eta^2 = .67$) und auch in dieser Variante wurde in Situation 2 signifikant früher übernommen als in Situation 1 ($F(1, 17) = 55.66; p < .001; \eta^2 = .77$) und in Situation 7 früher als in Situation 8 ($F(1, 17) = 63.16; p < .001; \eta^2 = .79$).
- **Flexible aber rechtzeitige Übernahmen im variablen Transitionskonzept.** Die variablen Übernahmeaufforderungen (Abbildung 22, unten) verbinden die Vorteile der beiden vorangegangenen Transitionskonzepte. In den Übernahmesituationen 1 und 8 erfolgen die Reaktionen deskriptiv noch etwas schneller als mit den hoch dringlichen Übernahmeaufforderungen. In den Situationen 2 bis 7

hingegen, in denen - dem geringen Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand entsprechend - wenig dringlich zur Übernahme aufgefordert wird, nutzen die Fahrer die zur Verfügung stehende Zeitreserve effektiv zur Weiterbearbeitung der Aufgabe. In dieser Variante zeigte sich ein deutlich schwächerer Haupteffekt der Übernahmesituation ($F(7, 84) = 6.28; p < .001; \eta^2 = .34$) und in Situation 2 wurde nicht signifikant schneller reagiert als in Situation 1 ($F(1, 12) = 2.80; p = .120$). Lediglich die Reaktionszeitunterschiede zwischen den Situationen 7 und 8 erreichten Signifikanz ($F(1, 12) = 34.99; p < .001; \eta^2 = .745$).

Transitionskonzept	Hoch dringlich			Wenig dringlich			Adaptive Dringlichkeit		
	1	2-7	8	1	2-7	8	1	2-7	8
Übernahmesituation									
Zeit ab TOR bis zur ersten Fahrerreaktion [s]	5.5 (1.7)	3.8 (0.9)	5.3 (1.4)	6.9 (1.4)	4.5 (0.8)	6.0 (0.9)	5.0 (1.6)	4.8 (1.3)	5.5 (1.4)

Tabelle 12. Mittlere Zeitdauern bis zur ersten Fahrerreaktion (Bremsen, Tastendruck am Lenkrad oder Lenkradwinkel > 2°) in Abhängigkeit von Transitionskonzept und Übernahmesituation (Standardabweichungen in Klammern).

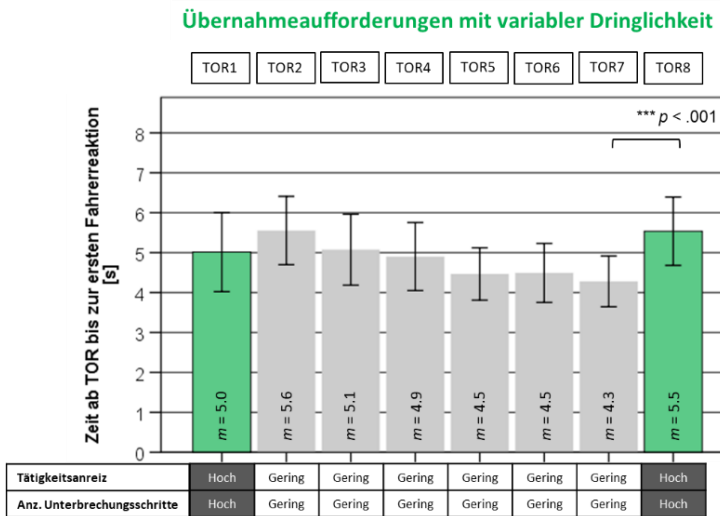
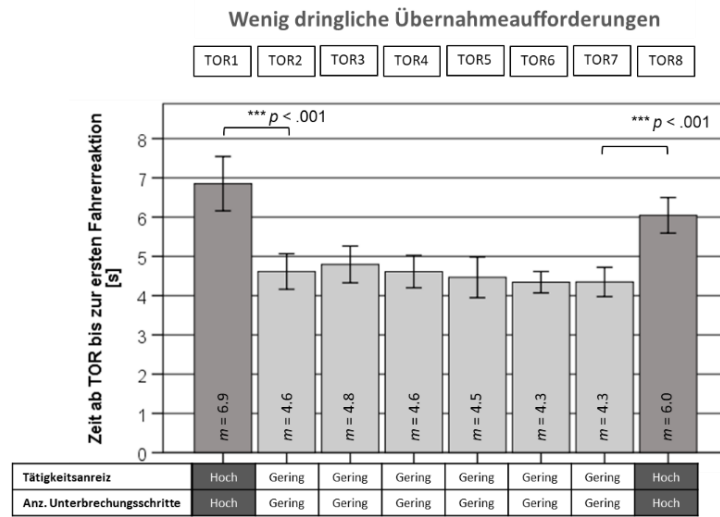
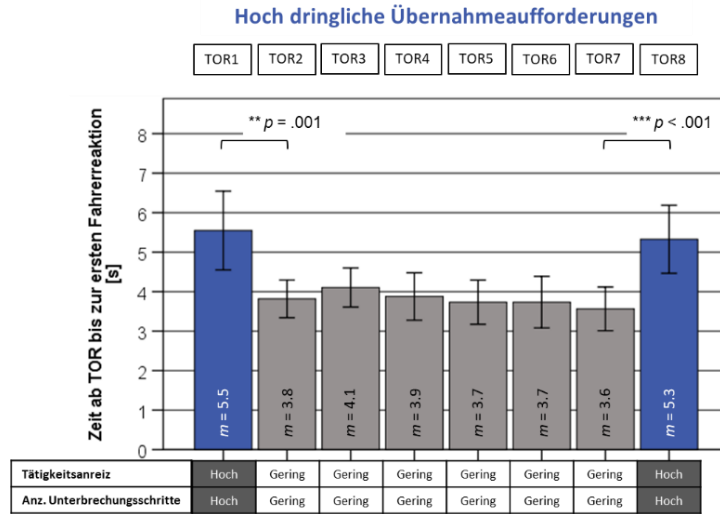


Abbildung 22. Mittlere Zeitdauer bis zur ersten Fahrerreaktion (Bremsen, Tastendruck am Lenkrad oder Lenkradwinkel > 2°) in Abhängigkeit von Motivation und Unterbrechungsaufwand für hoch dringliche (oben) und gering dringliche Übernahmeaufforderungen (Mitte) sowie für Übernahmeaufforderungen mit variabler Dringlichkeit (unten). Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle.

3.5.8.2 Subjektive Daten

Die nachfolgend berichteten subjektiven Daten wurden jeweils direkt im Anschluss an die jeweilige Übernahme-situation erhoben. Mittelwerte und Standardabweichungen der Situationsbewertungen sind zusammenfassend in Tabelle 13 dargestellt.

- Keine „nicht kontrollierbar“-Bewertungen im adaptiven Transitionskonzept.** Abbildung 23 zeigt die mittleren Kritikalitätseinschätzungen der Übernahme-situationen durch die Probanden. Zunächst fällt auf, dass die Situationen 2 bis 7 stets weniger kritisch beurteilt wurden als die Situationen 1 und 8 ($F(2, 80) = 40.35; p < .001; \eta^2 = .50$). Dieses Muster steht im Einklang mit den über die acht Situationen hinweg variierten Merkmalen Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand. Interessanter sind jedoch Unterschiede zwischen den drei Transitionskonzepten: Die adaptive Variante übertraf deskriptiv die hoch dringliche sowie die wenig dringliche durch die Abwesenheit von „nicht kontrollierbar“-Bewertungen und durch einen höheren Anteil „harmlos“-Bewertungen. Unterschiede zwischen den Transitionskonzepten erreichten keine statistische Signifikanz ($F(2, 40) = .540; p = .587$).

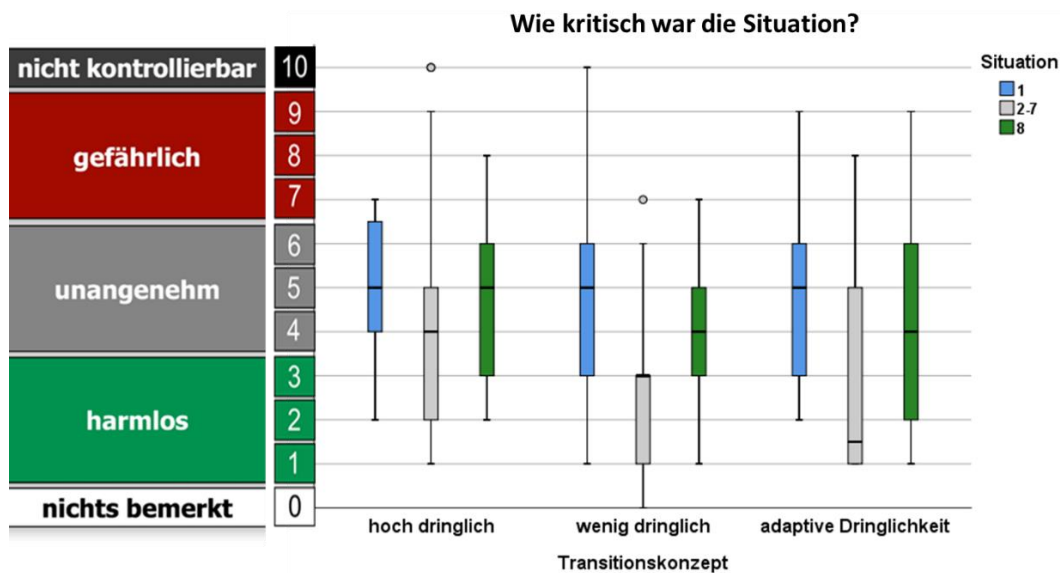


Abbildung 23. Boxplot-Diagramm zur Kritikalitätsbeurteilung der Übernahme-situationen auf der Skala nach Neukum et al. (2008) in Abhängigkeit von Übernahme-situation und Transitionskonzept.

- Große Unterschiede in der wahrgenommenen Aufdringlichkeit.** Das hoch dringliche Transitionskonzept wurde als besonders aufdringlich und das wenig dringliche Konzept als am wenigsten aufdringlich beurteilt (Abbildung 24). Die Situationen 1, 2 bis 7 und 8 unterschieden sich weder in der hoch dringlichen Variante ($F(2, 22) = 1.57; p = .231$) noch in der Variante mit geringer Dringlichkeit ($F(2, 34) = 1.27; p = .294$). Das adaptive Konzept bewegte sich in diesem Maß (je nach adaptiv ausgegebener Dringlichkeit) zwischen den beiden anderen Konzepten und fiel durch große Streuungen auf. Die beiden hoch dringlichen Warnungen des adaptiven Konzepts unterschieden sich weder in Situation 1 ($p = 1.000$) noch in Situation 8 ($p = .591$) von der hochdringlichen Variante und analog dazu unterschieden sich die wenig dringlichen Warnungen der Situationen 2 bis 7 nicht vom wenig dringlichen Konzept – sie wurden sogar deskriptiv noch weniger aufdringlich empfunden, wenngleich der Effekt statistische Signifikanz verfehlte ($p = .078$).

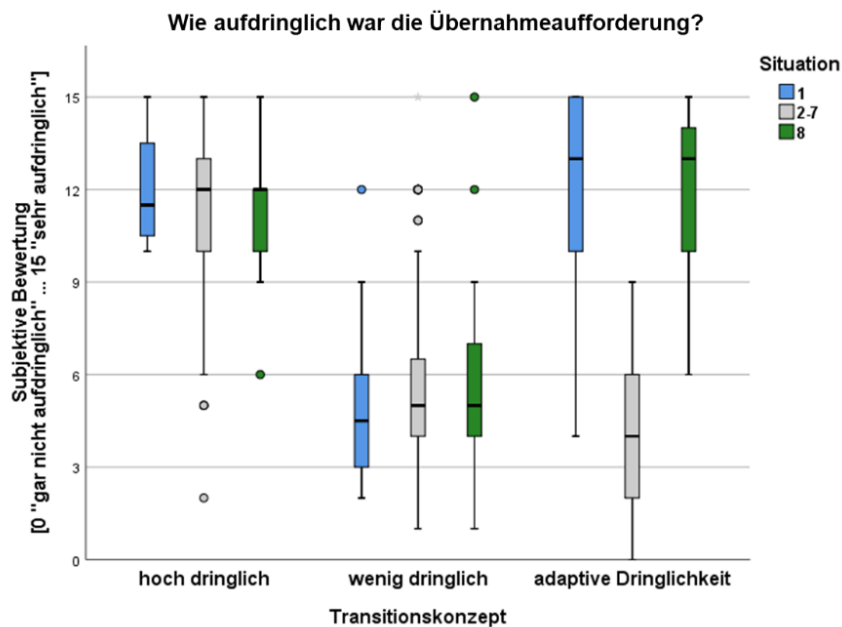


Abbildung 24. Boxplot-Diagramm zur Frage „Wie aufdringlich war die Übernahmeaufforderung?“ in Abhängigkeit von Übernahmesituation und Transitionskonzept.

- **Geringste Streuung der Urteile zu Passung der Übernahmeaufforderung im hoch dringlichen Konzept.** Bezüglich der Passung der Übernahmeaufforderung zur Situation streuten das hoch dringliche und das adaptive Transitionskonzept etwas stärker an das untere Ende der Skala als das hoch dringliche Konzept (Abbildung 25). Lediglich der Unterschied zwischen der hoch und der wenig dringlichen Variante erreichte statistische Signifikanz ($p = .012$).
-

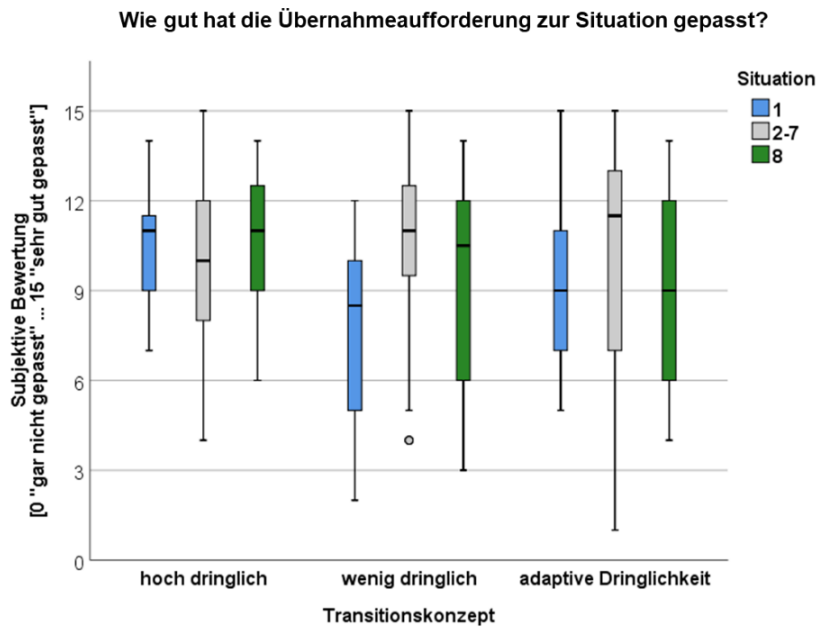


Abbildung 25. Boxplot-Diagramm zur Frage „Wie gut hat die Übernahmeaufforderung zur Situation gepasst?“ in Abhängigkeit von Übernahmesituation und Transitionskonzept.

- **Kaum negative Selbsteinschätzungen im adaptiven Transitionskonzept.** Bei der Abfrage, wie gut die Probanden die Situation gelöst hätten (Abbildung 26), wies nur das adaptive Transitionskonzept keine negativen Selbsteinschätzungen auf. Insgesamt fielen die Urteile aber sehr ähnlich aus und unterschieden sich zwischen den Transitionskonzepten nicht signifikant voneinander ($F(6, 78) = 1.03; p = .412$).

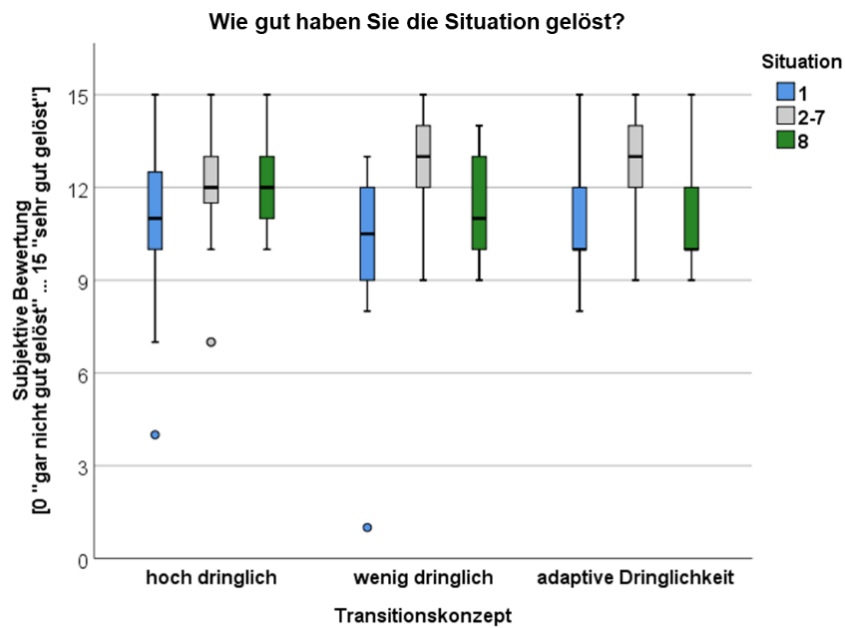


Abbildung 26. Boxplot-Diagramm zur Frage „Wie gut haben Sie die Situation gelöst?“ in Abhängigkeit von Übernahmesituation und Transitionskonzept.

- Die sonstigen Bewertungen der Übernahme-situationen bieten ein gemischtes Bild. Bei der Frage, wie hilfreich die Übernahmeaufforderung war, erhielt lediglich das hoch dringliche Konzept durchweg positive Bewertungen (Abbildung 27). Unterschiede zwischen den Transitions-konzepten verfehlten auch hier statistische Signifikanz ($F(6, 78) = 1.30; p = .267$).

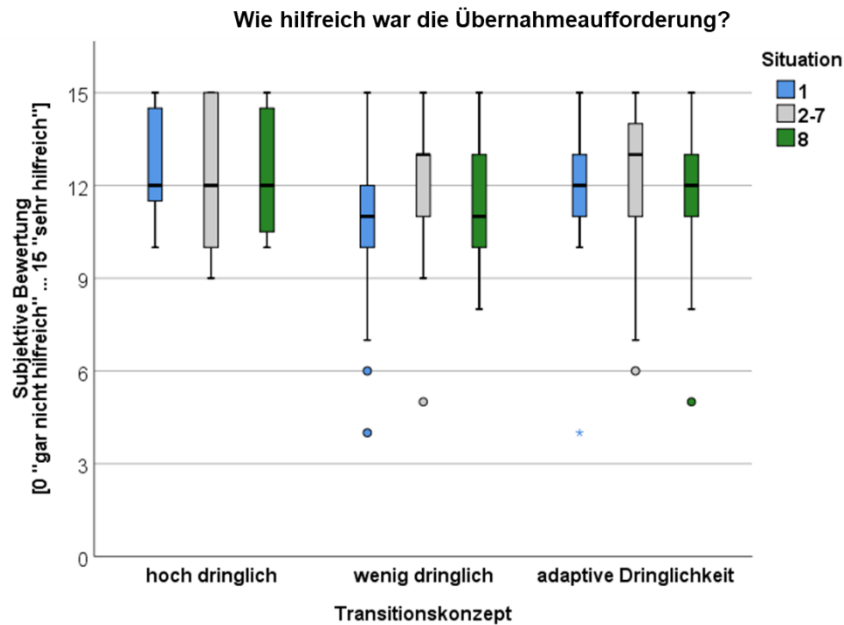


Abbildung 27. Boxplot-Diagramm zur Frage „Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung?“ in Abhängigkeit von Übernahme-situation und Transitions-konzept.

Transitions-konzept	Hoch dringlich			Wenig dringlich			Adaptive Dringlichkeit		
	1	2-7	8	1	2-7	8	1	2-7	8
Wie kritisch war die Situation? [0...10]	5.0 (1.8)	4.0 (2.4)	4.6 (1.8)	5.0 (2.2)	2.7 (1.5)	3.9 (1.7)	5.0 (2.5)	2.8 (2.3)	4.2 (2.5)
Wie hilfreich war die Übernahmeaufforderung? [0...15]	12.6 (1.8)	12.5 (2.0)	12.3 (2.1)	10.7 (2.8)	12.3 (1.5)	11.6 (1.9)	11.7 (2.7)	12.5 (1.9)	11.5 (2.8)
Wie aufdringlich war die Übernahmeaufforderung? [0...15]	12.0 (1.9)	11.8 (2.8)	11.3 (2.5)	5.1 (2.6)	5.8 (3.1)	5.7 (3.5)	12.0 (3.4)	4.0 (2.2)	12.0 (2.9)
Wie gut hat die ÜA zur Situation gepasst? [0...15]	10.3 (2.2)	10.1 (2.7)	10.5 (2.4)	7.5 (3.1)	10.5 (2.5)	9.7 (3.3)	9.2 (3.2)	10.1 (3.3)	8.7 (3.3)
Wie gut haben Sie die Situation gelöst? [0...15]	10.8 (2.9)	12.5 (1.5)	11.9 (1.4)	10.2 (2.7)	12.8 (1.3)	11.4 (1.5)	11.0 (2.1)	12.6 (1.4)	11.2 (2.0)

Tabelle 13. Mittelwerte der subjektiven Situationsbewertungen in Abhängigkeit des Transitions-konzepts und der Übernahme-situation (Standardabweichungen in Klammern).

In der Bewertung auf der *System Usability Scale* (SUS) schnitt das variable Konzept ähnlich positiv ab ($m = 86.2$; $sd = 9.7$) wie die Konzepte mit hoher ($m = 87.9$; $sd = 9.3$) und geringer ($m = 86.5$; $sd = 11.5$) Dringlichkeit. Unterschiede zwischen den SUS-Werten wurden nicht signifikant ($F(2, 41) = .102$; $p = .903$).

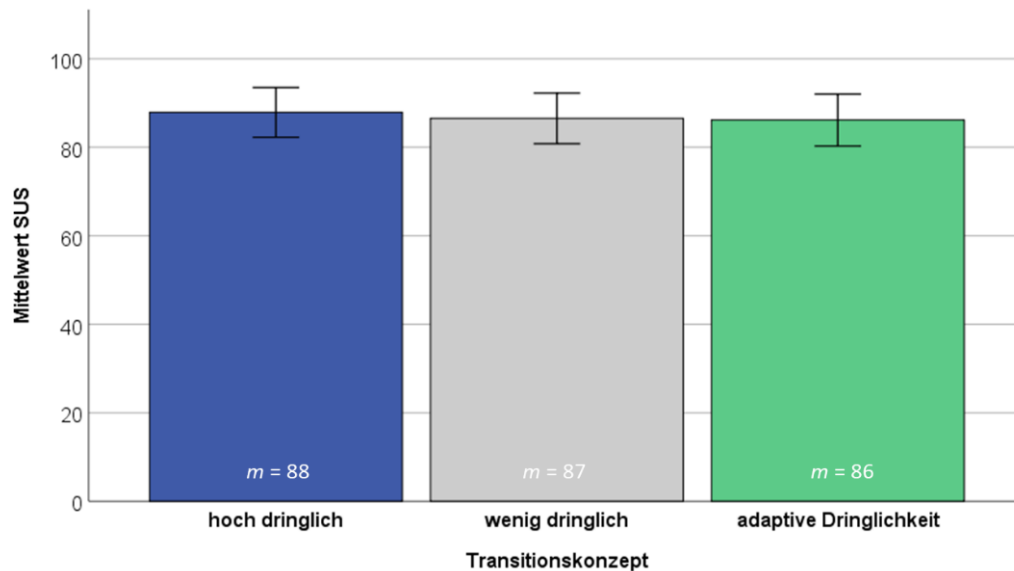


Abbildung 28. Mittlere SUS-Werte der drei Transitionskonzepte (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

Die Bewertungen der Nützlichkeit bzw. Zufriedenheit für die verschiedenen Transitionskonzepte auf der *System Acceptance Scale* (SAS) sind in Abbildung 29 dargestellt. Alle Konzepte erzielten ähnliche Nützlichkeitswerte. Bei den Zufriedenheitswerten schnitt die wenig dringliche Variante deskriptiv am besten ab. Unterschiede zwischen den Varianten erzielten keine Signifikanz ($F(2, 57) = .126$; $p = .882$).

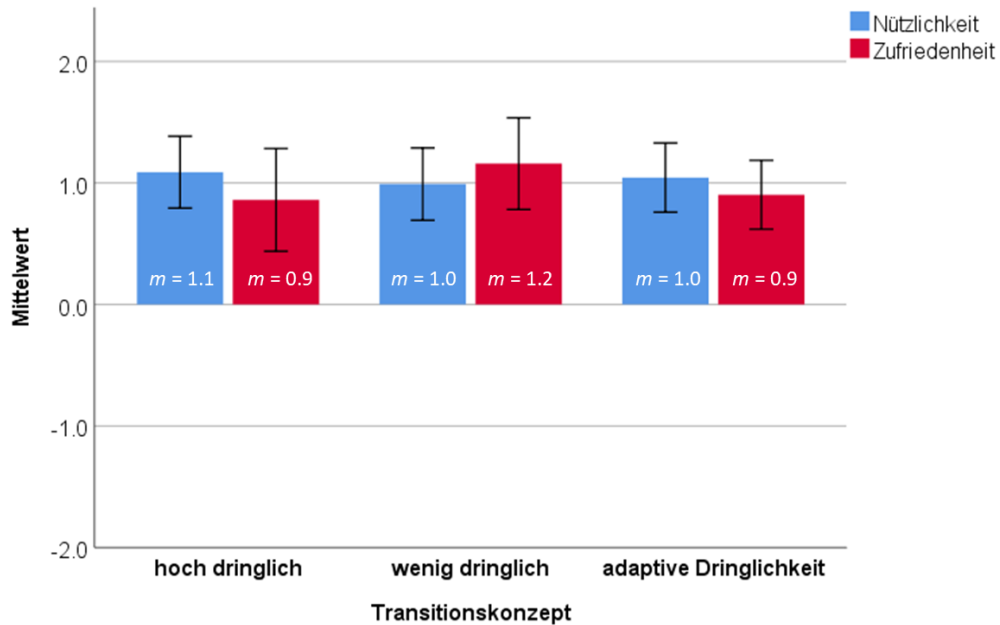


Abbildung 29. Mittlere SAS-Werte der drei Transitionskonzepte (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

Die im Anschluss an den Versuch erhobenen Einschätzungen des Tetris-Spiels durch die Probanden in Abhängigkeit des Tätigkeitsanreizes sind in Abbildung 30 dargestellt. Mittelwerte und Teststatistiken finden sich in Tabelle 14. Die Probanden empfanden das Spielen während einer realen, hochautomatisierten Autobahnfahrt in der Bedingung mit hohem Tätigkeitsanreiz als signifikant gefährlicher und schwerer zu unterbrechen als mit geringem Tätigkeitsanreiz und bewerteten ihre Motivation zum Tetris-Spielen bei hohem Tätigkeitsanreiz signifikant höher als bei geringem. Die Nachbefragung kann als Manipulations-Check angesehen werden. Insgesamt betrachtet fiel dabei der Effekt der Manipulationen sehr gering aus. Vor allem die unter beiden Bedingungen ähnlich hohe Motivation der Probanden zum Tetris-Spielen muss bei der Interpretation der objektiven Daten berücksichtigt werden.

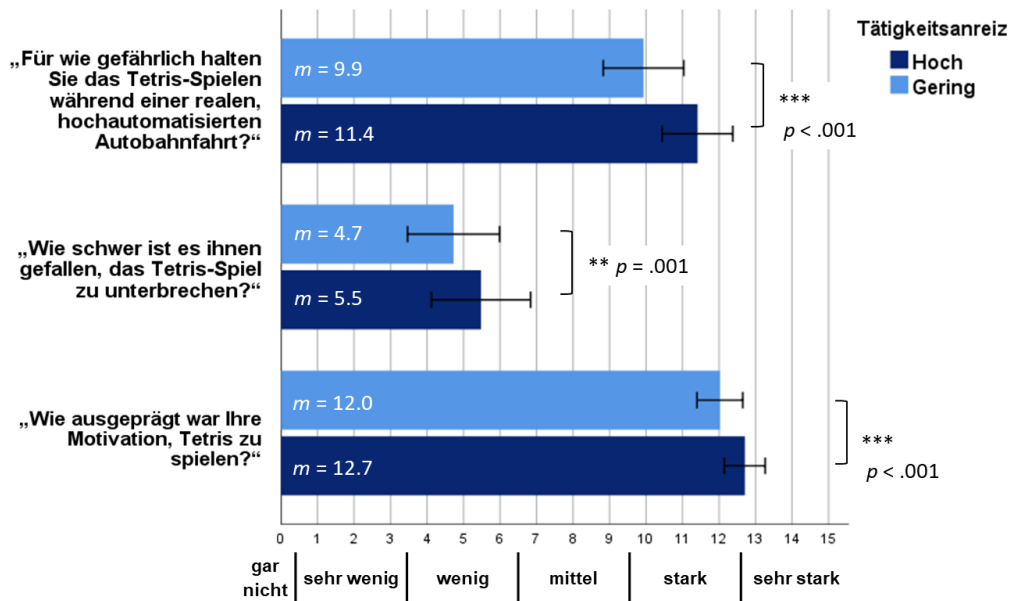


Abbildung 30. Mittlere Einschätzung des Tetris-Spiels durch die Probanden in Abhängigkeit des Tätigkeitsanreizes (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

	Tätigkeitsanreiz		Teststatistik
	gering	hoch	
„Für wie gefährlich halten Sie das Tetris-Spielen während einer realen, hochautomatisierten Autobahnfahrt?“	9.9 (3.6)	11.4 (3.2)	t(43) = 4.60, p < .001
„Wie schwer ist es Ihnen gefallen, das Tetris-Spiel zu unterbrechen?“	4.7 (4.1)	5.5 (4.5)	t(43) = 3.47, p = .001
„Wie ausgeprägt war Ihre Motivation, Tetris zu spielen?“	12.0 (2.1)	12.7 (1.8)	t(43) = 4.39, p < .001

Tabelle 14. Mittlere Beurteilungen der beiden Motivations-Varianten auf einer Skala von 0 („gar nicht“) bis 15 („sehr stark“) (Standardabweichungen in Klammern) sowie dazugehörige Teststatistiken.

3.5.9 Zwischenfazit und Diskussion

Mit Studie 3 ist es gelungen, einen Nutzen adaptiver Transitionskonzepte in L3-Übernahmesituationen experimentell nachzuweisen. Im verwendeten adaptiven Konzept drückte sich die jeweilige Passung von Übernahmeaufforderung, Fahrermotivation und Unterbrechungsaufwand darin aus, dass die Übernahmezeiten in dieser Gruppe über alle Situationen hinweg auf einem ähnlichen Niveau lagen. Die Dringlichkeit der Übernahmeaufforderung behielt in Situation 8 ihre Aussagekraft und wurde von den Fahrern als Informationsquelle effektiv genutzt, ohne dass die weniger dringlichen Aufforderungen in den Situationen 2 bis 7 einen messbaren Nachteil brächten. Fahrer konnten den Informationsgehalt der Systemausgaben offenbar

nutzen und den Zeitpunkt ihrer Übernahme daran anpassen. Dabei ist zweitrangig, ob den Fahrern die Passung zwischen Dringlichkeit der Übernahmeaufforderung und Tätigkeitsanreiz bzw. Unterbrechungsaufwand bewusst wurde. Die invariablen Transitionskonzepte waren der variablen Variante unterlegen: Das ausschließlich wenig dringliche Konzept wies in allen Übernahmesituationen deutlich höhere Reaktionszeiten auf. Dies gilt v. a. für die Situationen 1 und 8, in der sich die ungünstigen fahrerseitigen Übernahmebedingungen (hoher Anreiz der Tätigkeit und hoher Unterbrechungsaufwand) in deutlich verlängerten Übernahmezeiten niederschlugen. Die ausschließlich hoch dringliche Variante konnte sich zwar in den Situationen 1 und 8 mit dem variablen Konzept messen lassen und erzielte hier vergleichbar schnelle Übernahmereaktionen. Sie veranlasste die Probanden jedoch auch in den Situationen 2 bis 7 zu frühen Übernahmen und ging tendenziell mit kritischeren Situationsbewertungen einher. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass variable Übernahmeaufforderungen dem Fahrer mehr Zeit für die Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten zur Verfügung stellen können und diese wiederum von den Fahrern bei der Übernahme genutzt werden kann, ohne dass es zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Übernahmeleistungen kommt. Die Übernahmen in dieser Variante erfolgten stets rechtzeitig – weder zu spät noch zu früh. Für das variable Konzept sprechen auch die Kritikalitätseinschätzungen: Im Gegensatz zu den invariablen Konzepten gab es keine „nicht kontrollierbar“-Urteile und einen höheren Anteil an „harmlos“-Bewertungen. Übernahmeaufforderungen von geringer Dringlichkeit sind also nicht per se weniger effektiv: Im Rahmen adaptiver Transitionskonzepte können sie bei Situationen mit niedriger Kritikalität das Mittel der Wahl sein.

Zu den spezifischen Einschränkungen von Studie 3 gehört u. a. die gekoppelte Variation von Tätigkeitsanreiz und Unterbrechungsaufwand. Dadurch ist es nicht möglich, die Einflüsse der beiden Manipulationen getrennt voneinander zu beurteilen. Darüber hinaus weisen die Nachbefragungsergebnisse zu den fahrfremden Tätigkeiten darauf hin, dass die Variation des Tätigkeitsanreizes auch mit der neuen Manipulation nur unzureichend funktioniert hat, ähnlich wie bereits in Studie 2: Die Motivation zum Tetris-Spielen erwies sich als hoch, unabhängig davon, ob es für das Spielen externe Anreize gab oder nicht. Für das Kernergebnis ist dieser Befund allerdings unerheblich, da an einer erfolgreichen Manipulation des Unterbrechungsaufwandes keine Zweifel bestehen (vgl. Studie 2) und entsprechend dennoch gefolgert werden kann: Übergabekonzepte, welche sich an den Rahmenbedingungen einer fahrfremden Tätigkeit orientieren, können Vorteile bieten gegenüber invariablen Übergabekonzepten.

3.6 Studie 4: Adaptive Transitionskonzepte als Mittel zur Förderung erwünschter Verhaltensadaptation des Fahrers in Übernahmesituationen

In Studie 3 hatte sich gezeigt, dass variable Übergabekonzepte in der Lage sind, negative Verhaltensadaptation des Fahrers zu verhindern und die Wirksamkeit von Übernahmeaufforderungen über eine Vielzahl von Transitionen hinweg aufrecht zu erhalten. Studie 4 greift den Begriff der Fahreradaptation auf und soll das Wissen darüber vertiefen, welche Rolle in diesem Zusammenhang das für die Übernahme zur Verfügung stehende Zeitbudget spielt. Systemseitig wurde deshalb der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung als neue Manipulation eingeführt. Den Kern der Untersuchung bildet ähnlich wie in Studie 3 der Vergleich von Übernahmeaufforderungen, welche zu wesentlichen Merkmalen der Übernahmesituation (Unterbrechungsaufwand und Zeitbudget) passen und solchen, bei denen keine Passung zu diesen Merkmalen vorliegt.

3.6.1 Prüfzenario

Es wurde das aus Studie 3 bekannte Prüfzenario mit stehendem Pannenfahrzeug verwendet.

3.6.2 Unabhängige Variablen

3.6.2.1 Unterbrechungsaufwand

Variiert wurde einerseits wie schon in den vorangegangenen Studien die Anzahl der für die Unterbrechung der fahrfremden Tätigkeit erforderlichen Handlungsschritte. Um den Unterschied zwischen den Faktorstufen weiter zu vergrößern, war das Tablet in der Bedingung mit geringem Unterbrechungsaufwand mittels einer Halterung an der Mittelkonsole des Simulator-Cockpits befestigt, so dass bei Übernahmesituationen auch das Weglegen des Gerätes entfiel. In der Bedingung mit hohem Unterbrechungsaufwand glich die Übernahmeprozedur der in den Studien 2 und 3.

3.6.2.2 Kompatibilität

Darüber hinaus variierte die Passung der Übernahmeaufforderung zum jeweiligen Unterbrechungsaufwand. Hierzu wurde der jeweilige Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung manipuliert: In einem Teil der Übernahmesituationen betrug die TTC ab Ausgabe der Übernahmeaufforderung 7 s (kürzeres Zeitbudget bzw. späte Übernahmeaufforderung), in einem anderen Teil 10 s (längeres Zeitbudget bzw. frühe Übernahmeaufforderung). Diese beiden Varianten waren jeweils fest mit einer von zwei akustischen Ausgaben gekoppelt: In Situationen mit kürzerem Zeitbudget ertönte ein Signalton mit Warncharakter. In Situationen mit längerem Zeitbudget ertönte ein unaufdringlicher Gong. Ziel hierbei war es, die Probanden mit der Verknüpfung aus Signaltyp und Zeitbudget bereits in der Eingewöhnungsphase vertraut zu machen.

Die beiden unabhängigen Variablen ermöglichten die Gestaltung kompatibler sowie inkompatibler Übernahmesituationen:

- **Kompatible Situationen** bestanden aus hohem Unterbrechungsaufwand (das Tablet musste in der Box verstaut werden) und frühen Übernahmeaufforderungen bzw. aus geringem Unterbrechungsaufwand (das Tablet befand sich in der Halterung) und späten Übernahmeaufforderungen - das Zeitbudget war somit jeweils im Einklang mit dem Unterbrechungsaufwand.
- **Inkompatible Situationen** bestanden aus hohem Unterbrechungsaufwand und späten Übernahmeaufforderungen bzw. aus geringem Unterbrechungsaufwand und frühen Übernahmeaufforderungen – das Zeitbudget war somit jeweils gegengesetzt zum Unterbrechungsaufwand.

3.6.3 Abhängige Variablen

Auf objektiver Ebene wurde wie in Studie 3 die Zeit zwischen Ausgabe der Übernahmeaufforderung und der jeweils ersten der drei folgenden Fahrerreaktionen erfasst: Deaktivierung des Systems durch Bremsen, durch beidseitigen Tastendruck am Lenkrad oder durch Lenken (Lenkradwinkel $> 2^\circ$). Auch die minimale Zeit bis zur Kollision mit dem Pannenfahrzeug (Time-to-Collision, TTC) wurde aufgezeichnet⁶.

Auf subjektiver Ebene wurde wie in den vorangegangenen Studien nach jeder erlebten Übernahmesituation zunächst eine Kritikalitätsbeurteilung abgefragt mit Hilfe der Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen nach Neukum et al. (2008). Zur Abfrage der Akzeptanz des jeweils erlebten Systems kam die Akzeptanzbewertung nach Van der Laan et al. (1997) zum Einsatz. Bei dem Fragebogen handelt es sich um ein fünfstufiges semantisches Differential welches aus insgesamt neun Gegensatzpaaren besteht (z. B. *nützlich* – *nutzlos*). Der Proband kann sein Urteil zwischen beiden Polen somit je nach persönlichem Eindruck an fünf verschiedenen Stellen verankern. Die neun Items laden auf zwei unterschiedliche Skalen, eine Skala zur wahrgenommenen Nützlichkeit des Systems und eine zur Zufriedenheit mit dem System.

Sämtliche abhängigen Variablen von Studie 4 sind zusammenfassend in Tabelle 15 dargestellt.

⁶ Da sich das Pannenfahrzeug nicht bewegte, entsprach die TTC dem Sekundenabstand.

	Name	Erfassung	Einheit
Objektive Variablen	Zeit bis Bremsen	Simulatorsystem	[s]
	Zeit bis Tastendruck am Lenkrad	Simulatorsystem	[s]
	Zeit bis Lenkradwinkel >2°	Simulatorsystem	[s]
	Minimale Time-to-Collision (TTC)	Simulatorsystem	[s]
Subjektive Variablen	Kritikalitätsbewertung	Skala nach Neukum et al. (2008)	Skalenpunkte [0...10]
	Akzeptanzbewertung	Skala nach Van der Laan et al. (1997)	Skalenpunkte [-2...2]

Tabelle 15. Abhängige Variablen in Studie 4.

3.6.4 Versuchsplan

Studie 4 folgte einem reinen *within*-Design: Alle Teilnehmer erlebten sämtliche Kombinationen aus Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität. Dabei wurden in permutierter Reihenfolge ein kompatibler und ein inkompatibler Block hinsichtlich der Passung durchlaufen.

3.6.5 Versuchsablauf

Die Vorbereitung der Probanden auf die Testfahrt in Studie 3 glich im grundlegenden Ablauf der aus den Studien 1 bis 3. Besonderes Augenmerk lag dabei auf einer ausgiebigen Eingewöhnungsfahrt mit dem bereits beschriebenen Ziel, dass die Probanden die Verknüpfung aus Signaltyp und Zeitbudget erlernen. Dazu durchliefen sie zwei Durchgänge mit jeweils beiden Kombinationen aus Signaltyp und Zeitbudget. Im Anschluss folgten in zwei weiteren Durchgängen je zweimal die beiden Unterbrechungsvarianten. In der Eingewöhnungsfahrt wurden Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand somit getrennt behandelt, um zu verhindern, dass Verknüpfungen der beiden Faktoren erlernt werden.

Im Hauptversuch durchliefen alle Teilnehmer zwei Versuchsblöcke: Eine Sequenz mit kompatibler Kombination aus Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand (d. h. längeres Zeitbudget bei größerem Aufwand bzw. kürzeres Zeitbudget bei geringerem Aufwand) und einen Abschnitt mit inkompatiblen Kombinationen (d. h. längeres Zeitbudget bei geringerem Aufwand bzw. kürzeres Zeitbudget bei größerem Aufwand), wobei die Reihenfolge der Versuchsteile ausbalanciert wurde. Die Erhebung fand im statischen WIVW-Fahr-simulator statt.

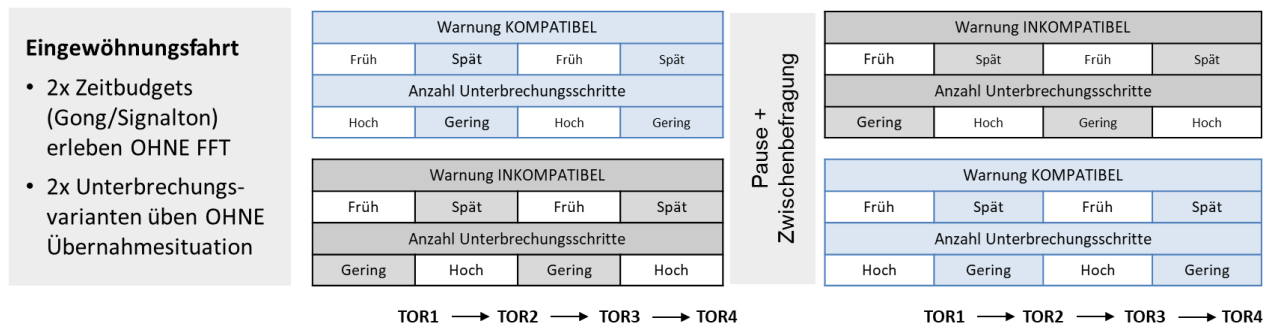


Abbildung 31. Schematische Darstellung des Versuchsablaufs von Studie 4.

3.6.6 Hypothesen

In kompatiblen Blöcken wurde, vereinfacht gesprochen, bei höherem Unterbrechungsaufwand mehr Zeit und bei geringerem Unterbrechungsaufwand weniger Zeit für die Übernahme der Fahrzeugkontrolle eingeräumt. Die in der Eingewöhnungsfahrt erlernten Signaltöne gaben den Fahrern hierbei Auskunft über die zur Verfügung stehende Übernahmezeit. Es bestand daher die Annahme, dass Probanden in beiden Unterbrechungsbedingungen die FFT jeweils rechtzeitig stoppen und dank Passung von Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand zu einem ähnlichen Zeitpunkt vor dem Pannenfahrzeug übernahmebereit sind. Entsprechend wurden auf Ebene der objektiven Daten für die kompatiblen Blöcke vergleichbare TTC_{min} -Werte erwartet. Für die Übernahmezeiten wurden deutliche Unterschiede zwischen den beiden Unterbrechungsvarianten angenommen. Auf subjektiver Ebene sollte sich die Passung aus Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand in geringen Kritikalitätswahrnehmungen der Übernahme-situationen sowie allgemein höherer Systemakzeptanz niederschlagen.

In inkompatiblen Blöcken hingegen standen Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand in einem ungünstigen Verhältnis zueinander: Bei höherem Unterbrechungsaufwand stand *weniger* Zeit und bei geringerem *mehr* Zeit für die Übernahme der Fahrzeugkontrolle zur Verfügung. Entsprechend war bei inkompatiblen Blöcken zu erwarten, dass Fahrer in beiden Unterbrechungsbedingungen im Mittel zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor dem Pannenfahrzeug die Fahrzeugkontrolle übernehmen, was sich in unterschiedlichen minimalen TTC-Werten niederschlagen sollte.

In der inkompatiblen Variante mit hohem Unterbrechungsaufwand waren Fahrer mit zusätzlichen Handlungsschritten zur FFT-Unterbrechung konfrontiert, aber hatten für diesen Ablauf deutlich weniger Zeit. Letzteres kündigte ihnen der erlernte Signalton an. Es wurde angenommen, dass Fahrer sich in dieser Kombination bei der Unterbrechung der FFT stärker beeilen. Bei geringem Unterbrechungsaufwand stand Ihnen dagegen deutlich mehr Zeit zur Verfügung als erforderlich und es bestand die Annahme, dass Fahrer sich in dieser Kombination mehr Zeit bei der Übernahme lassen. Beide angenommenen Effekte sollten Unterschiede in den Übernahmezeiten verringern gegenüber der kompatiblen Variante. Auf subjektiver Ebene

sollten sich die gegenläufigen Kombinationen aus Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand in allgemein geringerer Systemakzeptanz niederschlagen. Darüber hinaus wurden für die inkompatiblen Situationen mit hohem Unterbrechungsaufwand und geringem Zeitbudget höhere Kritikalitätswahrnehmungen der Übernahme-situationen erwartet.

3.6.7 Ausschluss von Daten

Von der Datenanalyse wurden Probanden komplett ausgeschlossen, welche

- Verständnisprobleme mit der Tablet Aufgabe und dem Versuchsablauf hatten (n = 2) oder
- im Moment des TOR nicht mit der Tablet Aufgabe beschäftigt waren, z. B. wenn ihr Spiel kurz vorher „Game Over“ geendet hatte (n = 5).

In mehreren Übernahme-situationen kam es vor, dass ein Proband es versäumte, in einer Bedingung mit hohem Unterbrechungsaufwand das Tablet in die Box zu legen oder die Box wie instruiert mit dem Deckel zu schließen (n = 11). In diesen Fällen wurde die jeweilige Situation als „Weglegen“ betrachtet, d. h. der Unterbrechungsaufwand als „gering“ kodiert.

Auch der umgekehrte Fall trat einmal auf (Verstauen des Tablets in der Box, obwohl ein Weglegen genügt hätte). Hier wurde der Unterbrechungsaufwand entsprechend als „hoch“ kodiert.

3.6.8 Ergebnisse

3.6.8.1 Objektive Daten

Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten und minimalen TTC-Werte sind zusammenfassend in Tabelle 16 dargestellt.

	Kompatibilität			
	Inkompatibel		Kompatibel	
	Unterbrechungsaufwand			
	gering	hoch	gering	hoch
Zeit ab TOR bis erste Fahrerreaktion [s]	3.7 (0.9)	5.6 (0.8)	3.3 (0.7)	6.3 (1.1)
Minimale TTC zum Pannenfahrzeug [s]	2.7 (0.9)	0.7 (0.5)	1.7 (0.7)	1.7 (0.9)

Tabelle 16. Zeit ab TOR-Ausgabe bis zur ersten Fahrerreaktion (Tastendruck, Bremsen oder Lenkradwinkel > 2°) sowie minimale TTC-Werte in Abhängigkeit von Kompatibilität und Unterbrechungsaufwand (Standardabweichungen in Klammern).

3.6.8.1.1.1 Minimale Time-to-Collision (TTC)

Abbildung 32 zeigt die minimale Time-to-Collision (TTC) zum Pannenfahrzeug in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität der Übernahmeaufforderung. Es ergaben sich folgende Befunde:

- **Kein Haupteffekt Kompatibilität.** Insgesamt betrachtet unterscheiden sich die minimalen TTC-Werte nicht signifikant zwischen den kompatiblen und inkompatiblen Situationen ($F(1, 38) = .013; p = .908$).
- **Haupteffekt Unterbrechungsaufwand.** In Situationen mit hohem Unterbrechungsaufwand zeigten sich, insgesamt betrachtet, im Mittel etwa 1 s kürzere minimale TTC-Werte als in Situationen mit geringem Unterbrechungsaufwand. Dieser deutliche Zeitunterschied wurde signifikant ($F(1, 38) = 145.36; p < .001; \eta^2 = .79$).
- **Interaktion aus Kompatibilität und Unterbrechungsaufwand.** Wie erwartet waren die mittleren minimalen TTC-Werte in der kompatiblen Bedingung nahezu identisch in beiden Unterbrechungsvarianten, während sie in der inkompatiblen Bedingung stark auseinanderfielen (Abbildung 32). Hier ergaben sich bei hohem Unterbrechungsaufwand sehr geringe und bei geringem Unterbrechungsaufwand sehr hohe TTC-Werte. Die Interaktion aus Kompatibilität und Unterbrechungsaufwand wurde signifikant ($F(1, 38) = 144.41; p < .001; \eta^2 = .79$).

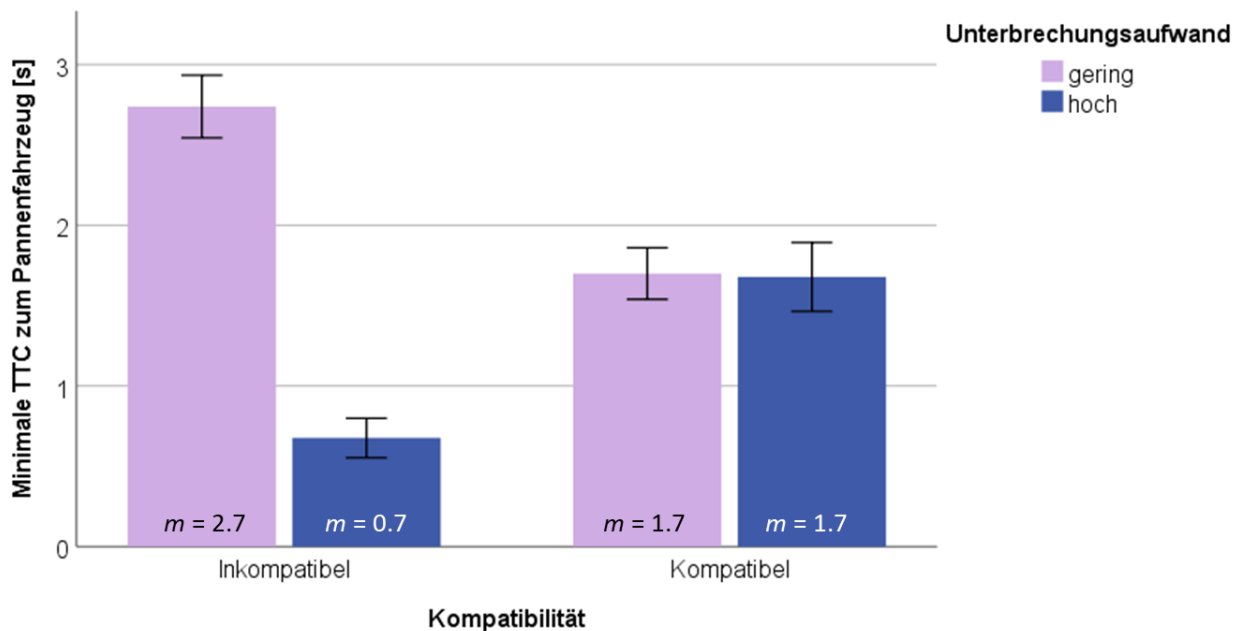


Abbildung 32. Minimale Time-to-Collision zum Pannenfahrzeug in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität der Übernahmeaufforderung (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

3.6.8.1.1.2 Übernahmezeiten

Die Reaktionszeiten nach der Übernahmeaufforderung sind in Abbildung 33 dargestellt. Dabei zeigten sich zwei Hauptbefunde:

- **Kein Haupteffekt Kompatibilität.** Insgesamt betrachtet unterscheiden sich die Übernahmezeiten nicht signifikant zwischen den kompatiblen und inkompatiblen Situationen ($F(1, 38) = 2.50; p = .122$).
- **Haupteffekt Unterbrechungsaufwand.** In Situationen, in denen für die Übernahme eine hohe Anzahl Unterbrechungsschritte auszuführen war (inkompatible Variante bei 7 s Zeitbudget bzw. kompatible Variante bei 10 s Zeitbudget), wurde im Mittel etwa 2.4 s später übernommen als in Situationen, in denen eine geringe Anzahl Unterbrechungsschritte auszuführen war. Dieser deutliche Zeitunterschied wurde signifikant ($F(1, 38) = 456.74; p < .001; \eta^2 = .92$) und spiegelt die Ergebnisse der Studien 2 und 3 wider.
- **Interaktion aus Kompatibilität und Unterbrechungsaufwand.** Wie erwartet fielen die Reaktionszeitunterschiede zwischen den beiden Unterbrechungsbedingungen in der kompatiblen Variante signifikant größer aus als in der inkompatiblen Variante ($F(1, 38) = 29.36; p < .001; \eta^2 = .44$).

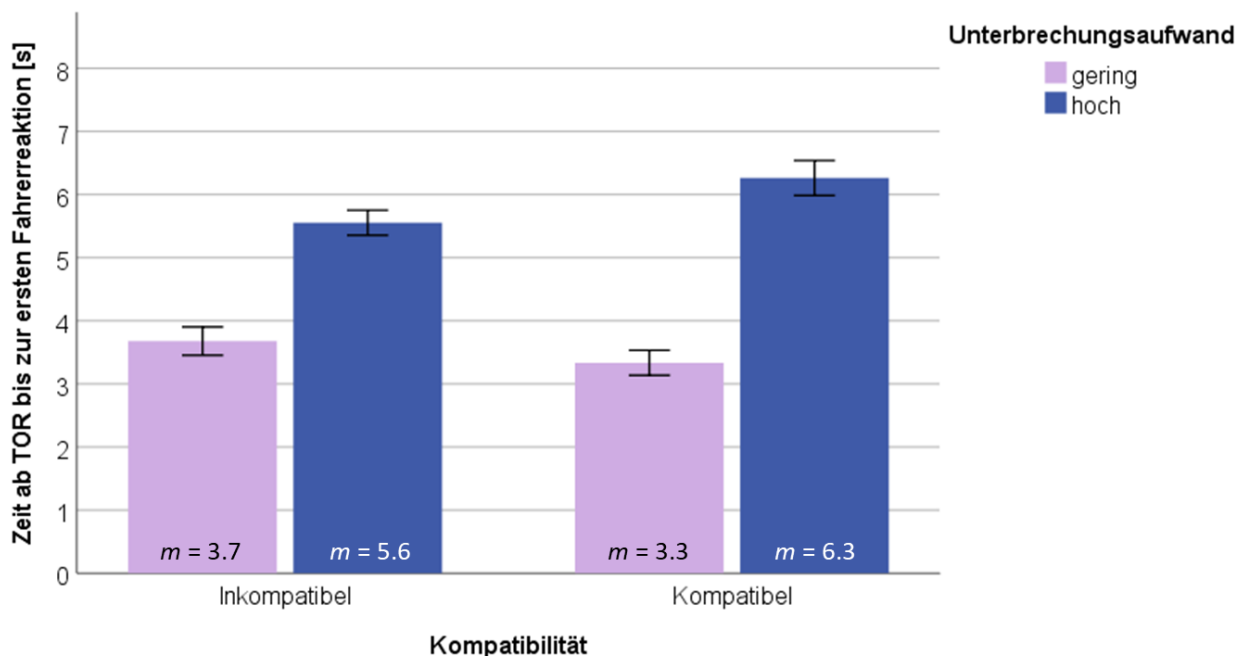


Abbildung 33. Zeit ab TOR-Ausgabe bis zur ersten Fahrerreaktion (Tastendruck, Bremsen oder Lenkradwinkel > 2°) in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

3.6.8.2 Subjektive Daten

Abbildung 34 zeigt die Kritikalitätsbewertungen der Übernahme-situationen durch die Probanden direkt im Anschluss an die Übernahme-situationen. Mittelwerte und Standardabweichungen der Kritikalitätsurteile sind in Tabelle 17 dargestellt.

- **Haupteffekt Unterbrechungsaufwand:** Übernahme-situationen bei geringem Unterbrechungsaufwand wurden insgesamt signifikant weniger kritisch beurteilt ($m = 4.5$; $sd = 2.1$) als Übernahme-situationen bei hohem Unterbrechungsaufwand ($m = 6.3$; $sd = 2.2$; $F(1, 40) = 92.23$; $p < .001$, $\eta^2 = .70$).
- **Haupteffekt Kompatibilität:** Kompatible Übernahme-situationen erhielten insgesamt signifikant weniger kritische Bewertungen ($m = 5.2$; $sd = 2.2$) als inkompatible Situationen ($m = 5.6$; $sd = 2.7$; $F(1, 40) = 4.84$; $p = .034$, $\eta^2 = .11$).
- **Interaktion aus Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität.** Bei hohem Unterbrechungsaufwand ergaben sich in inkompatiblen Situationen kritischere Situationsbewertungen als in kompatiblen Situationen. Bei geringem Unterbrechungsaufwand verhielt es sich umgekehrt: In inkompatiblen Situationen waren die Probanden weniger gefordert und die Bewertungen fielen meist weniger kritisch aus als in kompatiblen Situationen. Diese Interaktion aus Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität wurde signifikant ($F(1, 40) = 195.59$; $p < .001$, $\eta^2 = .83$).

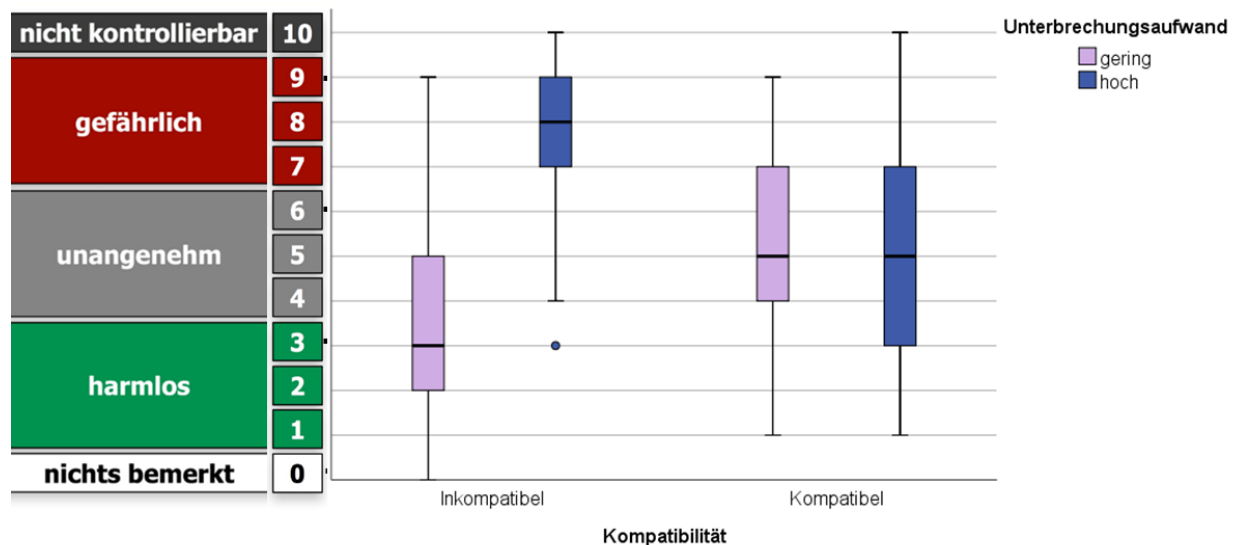


Abbildung 34. Kritikalitätsbewertungen auf der Skala nach Neukum et al. (2008) in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität der Übernahmeaufforderung.

	Kompatibilität			
	Inkompatibel		Kompatibel	
	Unterbrechungsaufwand			
	gering	hoch	gering	hoch
Kritikalitätsbeurteilung [0...10]	3.7 (1.9)	7.7 (1.7)	5.5 (2.1)	4.9 (2.2)

Tabelle 17. Mittelwerte der Kritikalitätsbewertung auf der Skala nach Neukum et al. (2008) in Abhängigkeit von Unterbrechungsaufwand und Kompatibilität der Warnung (Standardabweichungen in Klammern)

Abbildung 35 zeigt die Akzeptanzbewertungen der Probanden hinsichtlich der Automation aus dem kompatiblen und inkompatiblen Durchgang. Das Maß wurde im Anschluss an den jeweiligen Block erhoben. Obwohl beide Varianten positive Gesamtbewertungen erhielten, erzielten **kompatible Durchgänge signifikant höhere Nützlichkeits- ($t(48) = -2.58, p = .013$) und Zufriedenheitswerte ($t(48) = -2.86, p = .006$) als inkompatible Durchgänge**. Mittelwerte und Standardabweichungen der Kritikalitätsurteile sind in Tabelle 18 dargestellt.

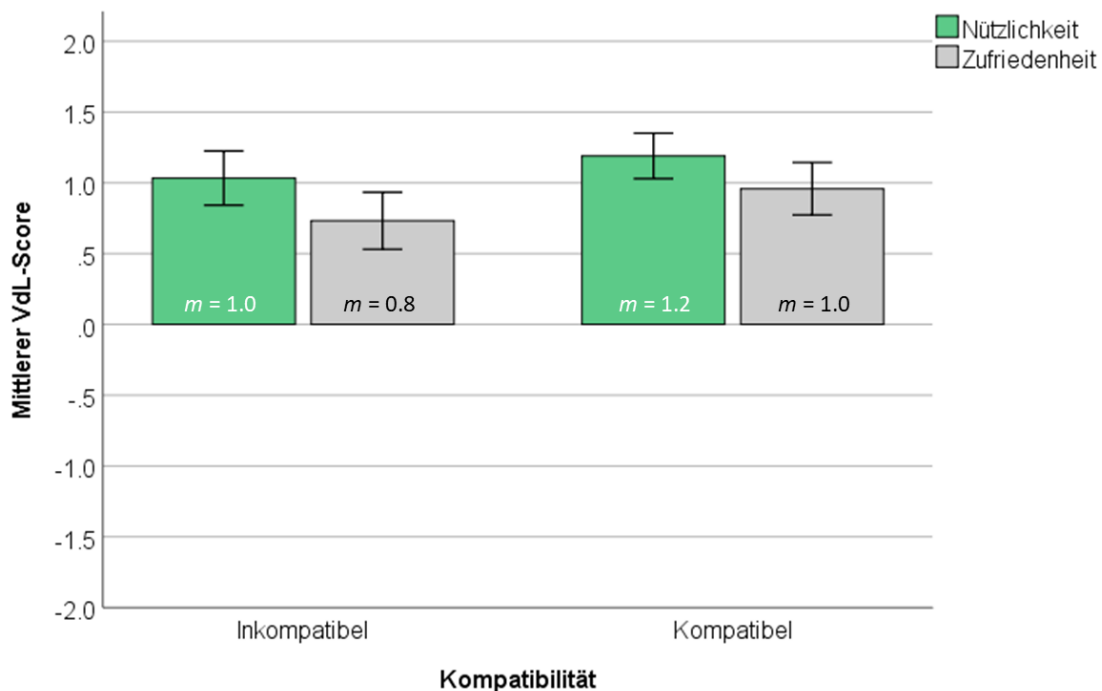


Abbildung 35. Mittlere Bewertung des Systems auf der Van der Laan-Skala in Abhängigkeit der Kompatibilität der Übernahmeaufforderung (Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervalle).

	Kompatibilität	
	inkompatibel	kompatibel
Van der Laan-Skala: Nützlichkeit	1.0 (0.6)	1.2 (0.5)
Van der Laan-Skala: Zufriedenheit	0.7 (0.6)	1.0 (0.6)

Tabelle 18. Mittlere Bewertung des Systems auf der Van der Laan-Skala in Abhängigkeit der Kompatibilität der Übernahmeaufforderung (Standardabweichungen in Klammern).

3.6.9 Zwischenfazit und Diskussion

Die Ergebnisse aus Studie 4 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Wie lange Fahrer für die Fahrzeugübernahme benötigen (im Sinne der Übernahmezeit), hängt stark vom Unterbrechungsaufwand der jeweils bearbeiteten FFT ab: Größerer Unterbrechungsaufwand geht mit längeren Übernahmezeiten einher. Dieses Ergebnis bestätigt die Befunde aus den vorangegangenen Studien. Dass die Unterschiede zwischen den Übernahmezeiten in der inkompatiblen Bedingung geringer ausfallen als in der kompatiblen Bedingung, zeigt darüber hinaus, dass auch die für die Übernahme zur Verfügung stehende Zeit selbst die Reaktionszeit beeinflusst: Haben Fahrer hierfür besonders wenig bzw. besonders viel Zeit wie in der inkompatiblen Variante, so unterbrechen sie die FFT auch schneller bzw. langsamer und kompensieren damit zumindest teilweise die Unterschiede im Unterbrechungsaufwand. Fahrer sind demnach motiviert und fähig, Zeitreserven im Rahmen von Übernahmeaufforderungen flexibel und effektiv zu nutzen.
- Wie nahe Fahrer dabei dem Pannenfahrzeug kommen (im Sinne der minimalen TTC) hängt stark von der Kompatibilität der Übernahmeaufforderung, d. h. der Passung aus Zeitbudget und Unterbrechungsaufwand ab. In der kompatiblen Variante gelingt es den Fahrern wie erwartet trotz unterschiedlicher Unterbrechungsaufwände, an einer ähnlichen Stelle die Fahrzeugkontrolle zu übernehmen, da sie für die jeweiligen Schritte ausreichend Zeit eingeräumt bekommen. In der inkompatiblen Variante gelingt die Übernahme der Fahrzeugkontrolle zwar bei geringem Unterbrechungsaufwand sehr früh, bei hohem Unterbrechungsaufwand dagegen äußerst spät. Eine Passung aus Übernahmeaufforderung und Unterbrechungsaufwand bietet somit auch Sicherheitsvorteile.
- Im Einklang zu den Befunden zur minimalen TTC werden Übernahmesituationen besonders dann als kritisch eingestuft, wenn der Unterbrechungsaufwand hoch und das Zeitbudget für die Übernahme gering ist.

- Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass kompatible Durchgänge höhere Nützlichkeits- und Zufriedenheitswerte erzielen als inkompatible.

3.7 Generelle Diskussion

3.7.1 Merkmale natürlicher fahrfremder Tätigkeiten mit Relevanz in Übernahmesituationen

Die vorliegende Arbeit geht mehreren empirischen Fragestellungen nach. Zunächst sollte aufgezeigt werden, durch welche übergeordneten Merkmale sich fahrfremde Tätigkeiten im automatisierten Fahren auszeichnen. **Studie 1** stellte einen explorativen Einstieg in die Thematik dar. Mehrere FFT kamen zum Einsatz, welche sich in einer Vielzahl von Dimensionen voneinander unterschieden (z. B. hinsichtlich der beteiligten Ressourcen, der räumlichen Orientierung der Aufgabe etc.).

Bemerkenswert ist zunächst, dass **sämtliche eingesetzten fahrfremden Tätigkeiten die Übernahme verzögerten** im Vergleich zu Übernahmesituationen ohne FFT. Der allgemeinspsychologische Befund, dass Aufgabenwechsel stets mit Wechselkosten u. a. in Form verlängerter Reaktionszeiten einhergehen, bestätigte sich wie erwartet im Kontext des hochautomatisierten Fahrens. Auch hier ist davon auszugehen, dass in erster Linie Interferenzen aus der vorangegangenen Aufgabe im Spiel waren – sowohl motorischer Natur bei den Tablet gebundenen Aufgaben als auch durch das zurückliegende Aufgaben-Set z. B. bei der rein kognitiven Denkaufgabe.

Das Tetris-Spiel brachte die längsten Verzögerungen bei der Übernahme mit sich – größer als die stark körperlich involvierende Suchaufgabe auf der Rückbank. Dass dies nicht allein am mobilen Endgerät an sich gelegen haben kann, zeigten die vergleichsweise raschen Übernahmen nach der sehr ähnlichen Video-Aufgabe. Der Spiel-Aufgabe schien ein besonderer **Anreiz zur Weiterbearbeitung** zu eigen zu sein. Zur selben Schlussfolgerung in einem ähnlichen Setting kamen Vogelpohl et al. (2016).

Ein weiterer wichtiger Befund aus Studie 1 besteht darin, dass die beiden Tablet gebundenen Aufgaben mit längeren Übernahmezeiten einhergingen als „Kopfrechnen“ und „Suchaufgabe“ in der zweiten Reihe. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass nur bei diesen beiden Aufgaben ein weiterer **„Zwischenschritt“ zur Unterbrechung**, nämlich das Pausieren des Videos bzw. des Spiels erforderlich war, um keine Informationen zu verpassen (Video) bzw. keine Punkte zu verlieren (Spiel). Neben dem Anreiz zur Weiterbearbeitung der FFT scheint somit das Ausmaß der zur Aufgabenunterbrechung erforderlichen motorischen Zwischenschritte einen wesentlichen Einfluss auf die Übernahme auszuüben.

3.7.2 Der Einfluss der Tätigkeitsmerkmale auf die Übernahmeleistung des Fahrers

Studie 2 griff die beiden Befunde aus Studie 1 auf und führte sie einer systematischen und kontrollierten Untersuchung zu mit dem Ziel, einen möglichen Einfluss dieser Merkmale auf die Fahrerleistungen in Übernahmesituationen nachzuweisen. Dazu wurden sowohl der Anreiz zur Aufgabenbearbeitung als auch der Unterbrechungsaufwand der Tätigkeiten systematisch variiert. Es zeigte sich ein deutlicher **positiver Zu-**

sammenhang zwischen dem Unterbrechungsaufwand der FFT und Übernahmezeiten sowie Kritikalitätsurteilen. Der Befund ist im Einklang mit den Forschungsarbeiten von Naujoks et al. (2019) sowie Vogelpohl et al. (2016), welche für FFT mit ausgeprägtem motorischem Unterbrechungsaufwand ebenfalls verzögerte Übernahmen fanden und wird darüber hinaus sowohl durch die Studien 2 und 4 der vorliegenden Arbeit sowie eine identische Manipulation in einer anderen Studie des Autors gestützt (Befelein et al., 2018). Mit Blick auf die allgemeinspsychologische Grundlagenforschung bestätigt dieses Ergebnis die Bedeutung motorischer Interferenzen der vorangegangenen Tablet Aufgaben. Darüber hinaus werden hier insbesondere Vorbereitungseffekte bei Aufgabenwechseln deutlich, denen zufolge die zur Verfügung stehende Zeitspanne vor einer erforderlichen Reaktion die mentale Vorbereitung auf die kommende Aufgabe beeinflusst und helfen kann, Wechselkosten zu verringern.

Eine systematische Variation des Tätigkeitsanreizes erwies sich bereits in Studie 2 als schwierig: Die beiden eingesetzten FFT wirkten sich in allen abhängigen Variablen nur geringfügig unterschiedlich aus. Die im Anschluss an den Versuch durchgeführte Befragung zu den FFT konnte zeigen, dass die Erzeugung verschiedener Anreizbedingungen durch die gewählten Aufgaben nicht gelungen ist: Auch das Mal-Spiel wurde als fordernd und spaßbringend beurteilt, wenngleich in geringerem Maße als das Tetris-Spiel. Ebenfalls in Studie 3 sowie einer anderen Arbeit des Autors (Befelein et al., 2018) wirkte sich die Anreizmanipulation, dort nun mittels externer Anreize variiert, nicht auf die selbstberichtete Motivation zur Aufgabebearbeitung aus. Die erhobenen Daten zeigen bei genauerer Analyse, dass dies weniger an einer zu geringen Motivation in den als hoch motivierend eingesetzten Bedingungen lag, sondern vielmehr an einem zu hohen Anreiz in den als wenig motivierend eingesetzten Varianten. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass den Teilnehmern der Studien jede Ablenkung von der monotonen L3-Fahrt willkommen und vor diesem Hintergrund die Ansprüche an eine FFT gering waren. Viele „Zeitvertreibe“, denen Menschen zur Überbrückung von Wartezeiten im Alltag nachgehen, sind anspruchslos und einfach (die meisten Smartphone-Apps bieten sich an dieser Stelle als Beispiel an). Ein weiterer Erklärungsansatz für die hohe Aufgabenmotivation in den als wenig motivierend eingesetzten Varianten könnte darin liegen, dass Probanden durch die Anwesenheit eines Versuchsleiters generell daran gelegen war, eine gute Leistung im Tetris-Spiel bzw. im Mal-Spiel abzuliefern, selbst wenn ihnen explizit mitgeteilt wurde, dass es auf ihre Leistung nicht ankomme. Auch ein Zusammenwirken beider genannter Erklärungen ist denkbar.

Weitere Studien, welche isoliert die Auswirkungen unterschiedlich hoher Tätigkeitsanreize von FFT auf Übernahmeleistungen im hochautomatisierten Fahren untersuchen, liegen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor.

3.7.3 Das Potenzial adaptiver Übernahmekonzepte

Darüber hinaus soll in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen werden, welches Potenzial solche Übernahmeaufforderungen besitzen, welche adaptiv sind im Hinblick auf die gefundenen Merkmale. Die Studien 3 und 4 beschäftigten sich entsprechend mit einem möglichen Nutzen adaptiver Übernahmeaufforderungen. In Studie 3 wurden invariable Systeme mit einer Alternative verglichen, deren Übernahmeaufforderungen sich variabel nach dem Anreiz und dem Unterbrechungsaufwand der jeweiligen fahrfremden Tätigkeit richteten. Zusätzlich wurde zum Zweck einer stärkeren Anreizmanipulation nunmehr ausschließlich das Tetris-Spiel eingesetzt, allerdings mit einer starken Variation des externen Anreizes. Ungeachtet der Tatsache, dass diese Manipulation sich auch unter diesen Bedingungen als nicht belastbar erwies, konnte **Studie 3** den wichtigen Befund liefern, dass **Fahrer prinzipiell den Informationsgehalt adaptiver Systemausgaben effizient nutzen und den Zeitpunkt ihrer Übernahme daran anpassen können**. Dieses Ergebnis ist im Einklang mit einem weiteren allgemeinpsychologischen Grundlagenbefund zu Vorbereitungseffekten, demzufolge der Proband die kommende Aufgabe für eine optimale Vorbereitung möglichst gut kennen muss. Eine Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund bestehender Forschungsarbeiten zur Adaptivität von Übernahmeaufforderungen gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen und Methoden schwieriger. Übereinstimmung zeigt sich jedoch mit Van der Heiden et al. (2017) dahingehend, dass Übernahmeaufforderungen, die dem Fahrer Informationen über die Dringlichkeit der Situation vermitteln, dessen Reaktionszeiten verkürzen können. Zwar fanden Roche und Brandenburg (2019) keinen Vorteil adaptiver Systeme, die Studie hatte jedoch einen anderen Schwerpunkt. Dort variierte man Zeitbudget und Dringlichkeit der Übernahmeaufforderung getrennt voneinander und verglich die Mittelwerte. In Studie 3 hingegen wurden anhand einer festgelegten Abfolge unterschiedlicher FFT-seitiger Anreiz- und Unterbrechungsbedingungen die mittelfristigen Auswirkungen verschieden dringlicher Transitionskonzepte miteinander verglichen. Das Zeitbudget der Fahrer blieb dabei konstant. Studie 3 erweitert somit vor allem die Erkenntnisse über regelmäßig wiederkehrende Übernahmeaufforderungen. So konnte durch den Einsatz des adaptiven Übernahmekonzeptes die Wirksamkeit der Übernahmeaufforderungen insbesondere über eine Vielzahl von Transitionen hinweg aufrechterhalten werden, ohne dass es zu negativen Verhaltensadaptation des Fahrers kam, d. h. ohne dass die Warnungen „sich abnutzten“. Dieser Befund ist vor allem vor dem Hintergrund relevant, dass Prototypen hochautomatisierter Fahrzeuge die Fahrzeugkontrolle relativ häufig an den Fahrer zurückgeben (vgl. Abschnitt 2.2.1).

In **Studie 4** wurde der Begriff der Fahreradaptation erneut aufgegriffen und untersucht, welchen Nutzen solche Transitionskonzepte bringen könnten, welche adaptiv sind im Hinblick auf den Unterbrechungsaufwand der FFT und auf die für die Übernahme zur Verfügung stehende Restzeit (gesteuert durch den Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung).

Wie berichtet, übernahmen Fahrer die Fahrzeugkontrolle insgesamt schneller bzw. langsamer, wenn sie hierfür besonders wenig bzw. besonders viel Zeit hatten. Neben der bereits beschriebenen Übereinstimmung mit den Grundlagenbefunden zu Vorbereitungseffekten steht dieses Ergebnis im Einklang mit anderen Forschungsarbeiten, bei denen das Zeitbudget oder die Dringlichkeit der Übernahmeaufforderung variiert wurden (Gold, Damböck, et al., 2013; Roche & Brandenburg, 2019). Eine Erweiterung stellt jedoch der Befund aus Studie 4 dar, demzufolge sich die Übernahmezeiten zwischen beiden Unterbrechungsvarianten in inkompatiblen Durchgängen deutlich weniger stark unterscheiden als in kompatiblen. Hierdurch konnte nachgewiesen werden, dass Fahrer bei Zeitmangel auch Unterschiede im Unterbrechungsaufwand teilweise kompensieren können. An welcher Stelle die zugrunde liegende Kompensation durch die Fahrer stattfindet – bereits bei der Reaktion auf die Übernahmeaufforderung, im Laufe der Aufgabenunterbrechung oder über den gesamten Zeitraum hinweg – könnte Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein. In jedem Fall zeigen die Ergebnisse, dass Fahrer motiviert und in der Lage sind, Zeitreserven im Rahmen von Übernahmeaufforderungen flexibel und effektiv zu nutzen.

Ein weiterer Erkenntnisgewinn aus Studie 4 liegt im Nachweis von Sicherheits- und Akzeptanzvorteilen adaptiver Übernahmekonzepte. Dass die Übernahme der Fahrzeugkontrolle in der inkompatiblen Variante zwar bei geringem Unterbrechungsaufwand sehr früh, bei hohem Unterbrechungsaufwand dagegen äußerst spät und erst kurz vor dem Pannenfahrzeug erfolgte, unterstreicht die Wichtigkeit von auf den Unterbrechungsaufwand abgestimmten Warnungen aus Perspektive der Verkehrssicherheit. Analog dazu wurden kompatible Übernahmesituationen von den Teilnehmern selbst weniger kritisch bewertet als inkompatible. Erstere erhielten darüber hinaus insgesamt höhere Nützlichkeits- und Zufriedenheitsbewertungen durch die Fahrer als inkompatible. Sie haben somit das Potenzial, hochautomatisierten Fahrsystemen, welche den Fahrer zum aktuellen Entwicklungsstand und in absehbarer Zeit noch regelmäßig zur Übernahme der Fahraufgabe auffordern werden, zu einer breiteren fahrerseitigen Akzeptanz zu verhelfen.

3.7.4 Grenzen der vorliegenden Untersuchungen

3.7.4.1 Zeitbudgets

Einen methodischen Einwand zu den vorangehenden Untersuchungen stellt die Tatsache dar, dass die vorliegenden Daten bei relativ kurzen Zeitbudgets des Fahrers gewonnen wurden. In Serienfahrzeugen ist nicht davon auszugehen, dass L3-Systeme bei plötzlichen Hindernissen auf der eigenen Fahrspur mit ca. 8 s zeitlichem Handlungsspielraum die Dringlichkeit der Übernahmeaufforderung in irgendeiner Form variieren werden. In solchen Fällen dürften und sollten generell hohe Dringlichkeitsstufen gewählt werden. Die vorliegende Arbeit verfolgte jedoch neben einem hohen Anwendungsbezug das Ziel, auch grundlagenpsychologischen Effekten in einem experimentellen Aufbau Raum zu geben. Hierfür war es notwendig, Manipulationen so zu wählen, dass die erwarteten Effekte - sofern vorhanden - auch klar zu Tage treten ohne durch

Störeinflüsse verdeckt zu werden. Deshalb wurden die Zeitbudgets so festgelegt, dass sowohl Bodeneffekte (der Fahrer schafft die Übernahme in keiner Experimentalbedingung rechtzeitig und kollidiert) als auch Deckeneffekte (der Fahrer übernimmt immer zur selben Zeit, Unterschiede in den Manipulationen verschwinden in den langen Zeiträumen) vermieden werden.

3.7.4.2 Fahrfremde Tätigkeiten

Die Grenzen einer gezielten Anreizmanipulation der jeweiligen FFT in den durchgeführten Experimenten wurden bereits diskutiert. Darüber hinaus war eine systematische Variation des Unterbrechungsaufwandes nur durch die Instruktion entsprechender Unterbrechungsschritte (Weglegen vs. Verstauen in Box) möglich. Was konkret im Falle einer Übernahmesituation zu tun war, musste somit jeweils vor einem hochautomatisierten Fahrabschnitt vom Versuchsleiter instruiert und von den Probanden memoriert werden, was zugegebenermaßen eine unnatürliche Situation darstellt. Die Vermutung, das Memorieren der jeweiligen Unterbrechungsinstruktion stelle einen zusätzlichen kognitiven Aufwand für die Teilnehmer dar, wird durch die Beobachtung gestützt, dass es auf Seiten der Probanden gelegentlich zur Verwechslung der Unterbrechungsschritte kam. Die betreffenden Einzelfälle wurden aber wie in den jeweiligen Abschnitten zum Datenausschluss dokumentiert und entsprechend umcodiert.

Ein weiterer Kritikpunkt an den eingesetzten FFT ist die Tatsache, dass beim Tetris-Spiel streng genommen weder von einem gleichbleibenden Tätigkeitsanreiz noch von einer kontinuierlichen Aufgabenschwierigkeit auszugehen ist. Vielmehr ist anzunehmen, dass beide Maße sowohl mit der Annäherung eines jeweiligen Spielsteins an die vorhergehenden Spielsteine als auch mit Fortschreiten des Spiels (durch Erreichen eines höheren Schwierigkeitslevels) etwas zunehmen. Auch ist davon auszugehen, dass weniger erfolgreiche Spieler stärker vom Spiel eingebunden werden als geübte Spieler. Allerdings wurden Übernahmesituationen, in denen Fahrer beim Tetris-Spiel ein „Game-Over“ erreicht hatten, wie berichtet ausgeschlossen und die Ergebnisse der Studien zeigten einen hohen Tätigkeitsanreiz über alle Spieler hinweg. Mögliche Schwankungen im Verlauf des Spiels können deshalb vernachlässigt werden.

4 Ausblick

Das L3-Fahren stellt mit der Möglichkeit einer vollständigen Abwendung des Fahrers von der Fahraufgabe bei gleichzeitigem Erfordernis kurzfristiger Übernahmebereitschaft vermutlich die anspruchsvollste Stufe der Fahrzeugautomation dar. Neben hoch komplexen Abläufen im Autobahnverkehr einschließlich deren Anforderungen an die Fahrzeugsensorik ist der Mensch als Rückfallebene für die Automation ein schwer kalkulierbarer Mitspieler. Eine besondere Rolle kommt hierbei den Beschäftigungen zu, denen der Fahrer während hochautomatisierter Fahrabschnitte nachgehen kann.

Die vorliegende Arbeit liefert mehrere Erkenntnisse zur Thematik. Zunächst wird verdeutlicht, dass fahrfremde Tätigkeiten Merkmale besitzen können, die den Fahrer in Übernahme-situationen vor besonders hohe Herausforderungen stellen. Neben kognitiven Beanspruchungen kann vor allem ein hoher Aufwand, die jeweilige Tätigkeit zu unterbrechen, Übernahmezeiten deutlich verlängern und damit zu kritischen Situationen führen. Darüber hinaus zeigt sich, dass Fahrer während hochautomatisierter Fahrabschnitte auch vermeintlich monotonen Beschäftigungen wie einem Mal-Spiel für Kinder mit hoher Motivation nachgehen und es schwerfallen kann, überhaupt Aufgaben mit geringem Anreiz zu finden, um Motivationsunterschiede abzubilden. Umso stärker sind die Ablenkungseffekte, die für fahrfremde Tätigkeiten im realen Fahrgeschehen zu erwarten sind. Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 erläutert, ist davon auszugehen, dass Personen am Steuer hochautomatisierter Fahrzeuge über weite Zeiträume Tätigkeiten nachgehen werden, welche einerseits stark motivierend und andererseits aufwändig zu unterbrechen und mit dem Hantieren von Gegenständen verbunden sind (z. B. Lesen, Nachrichten schreiben auf mobilen Endgeräten, Verzehr von Speisen etc.).

Indessen wurde das Potenzial adaptiver Übernahmekonzepte deutlich: Fahrer sind dazu motiviert und in der Lage, entsprechende Übernahmeaufforderungen zu differenzieren und zu erlernen, womit sichere Übernahmen und eine Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets einhergehen. Auch eine Kompensation aufwändiger Unterbrechungsbedingungen ist ihnen teilweise möglich. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass adaptive Transitionskonzepte die Fahrsicherheit und die Akzeptanz der Fahrsysteme seitens des Fahrers verbessern können.

Die zukünftige Entwicklung des hochautomatisierten Fahrens bleibt ein spannendes Thema. Bei niedrigen Geschwindigkeiten in Stau-Szenarien bieten erste Fahrzeughersteller unter strengen Voraussetzungen L3-Fahren an und übernehmen hierbei das Haftungsrisiko - vermutlich, weil der Nutzen für die Kunden sowie die Systemzuverlässigkeit bezüglich vorausschauender Sensorik in diesem abgegrenzten Rahmen besonders groß sind. Bei höheren Geschwindigkeiten ist ein sicherer L3-Betrieb mit Blick auf vorliegende Arbeit nur vorstellbar, wenn - neben bestmöglicher Sensortechnik sowie der Kommunikation zwischen Fahrzeugen - der Fahrerzustand korrekt erfasst und der jeweiligen Situation angemessene Übernahmeaufforderungen ausgegeben werden. Entsprechende Systeme durchlaufen bereits intensive Tests und haben das Potenzial, Sicherheit und Kundenakzeptanz gleichermaßen zu gewährleisten.

5 Literaturverzeichnis

Allport, A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing*, 15, 421.

Allport, A., & Wylie, G. (1999). Task-switching: Positive and negative priming of task-set. In G. M. Humphreys, J. Duncan, & A. M. Treisman (Eds.), *Attention, space, and action: Studies in cognitive neuroscience*. Oxford: Oxford University Press.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation *Analysis, design and evaluation of man-machine systems* (pp. 129-135): Elsevier.

Befelein, D., Boschet, J., & Neukum, A. (2018). *Influence of non-driving-related tasks' motivational aspects and interruption effort on driver take-over performance in conditionally automated driving*. Paper presented at the 6th international conference on driver distraction and inattention, Gothenburg, Sweden. Retrieved from: <http://ddi2018.org/wp-content/uploads/2018/10S>.

Berghöfer, F., Purucker, C., Naujoks, F., Wiedemann, K., & Marberger, C. (2018). Prediction of Take-over Time Demand in Conditionally Automated Driving-Results of a Real World Driving Study. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*.

Borojeni, S. S., Weber, L., Heuten, W., & Boll, S. (2018). *From reading to driving: priming mobile users for take-over situations in highly automated driving*. Paper presented at the Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services.

Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4-7.

Bueno, M., Dogan, E., Selem, F. H., Monacelli, E., Boverie, S., & Guillaume, A. (2016). *How different mental workload levels affect the take-over control after automated driving*. Paper presented at the 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).

Bundesen, C. (2007). Still Clever After All These Years: Searching for the Homunculus in Explicitly Cued Task Switching. *Journal of experimental psychology*, 33(4), 978-994.

Bundestag, D. (2017, 29.03.). *Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur (15. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksachen 18/11300, 18/11534, 18/11683 Nr. 10 – Entwurf eines ... Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes*. Retrieved from <https://www.cr-online.de/1811776.pdf>

Bundestag, D. (2017, 30.03.). *Straßenverkehrsgesetz für automatisiertes Fahren geändert*. Retrieved from <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2017/kw13-de-automatisiertes-fahren-499928>

Cabrall, C. D., Janssen, N. M., & De Winter, J. C. (2018). Adaptive automation: automatically (dis)engaging automation during visually distracted driving. *PeerJ Computer Science*, 4, e166.

Cellier, J.-M., & Eyrolle, H. (1992). Interference between switched tasks. *Ergonomics*, 35(1), 25-36.

Cohen-Lazry, G., Katzman, N., Borowsky, A., & Oron-Gilad, T. (2019). Directional tactile alerts for take-over requests in highly-automated driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 65, 217-226.

Common European Framework of Reference for Languages: learning, teaching, assessment. (0521005310). (2001). Cambridge University Press.

- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. *Tagungsband der VDI-Tagung Fahrerassistenz in München, 15*, 16ff.
- Damos, D. (1997). *The Effect of Operational Interruptions on Flight Crew Performance*: Los Angeles, CA: Damos Research Associates, Inc.
- De Jong, R. (2000). An intention-activation account of residual switch costs. *Control of Cognitive Processes: Attention and Performance XVIII*, eds Monsell S, Driver J: MIT Press, Cambridge, MA.
- Diederichs, F., Bischoff, S., Widlroither, H., Reilhac, P., Hottelart, K., & Moizard, J. (2015). *Smartphone integration and SAE level 3 car automation: a new cockpit concept and its evaluation in a car simulator*. (Vol. 2264). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Diels, C., & Bos, J. E. (2016). Self-driving carsickness. *Applied Ergonomics*, 53, 374-382.
- DMV. (2021). Disengagement Reports. Retrieved from <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/disengagement-reports/>
- Endsley, M. R. (1987). *The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting.
- Eriksson, A., & Stanton, N. (2016). Take-over time in highly automated vehicles: non-critical transitions to and from manual control. *Human factors*.
- Fagot, C. A. (1995). *Chronometric investigations of task switching*. ProQuest Information & Learning.
- Feldhütter, A., Kroll, D., & Bengler, K. (2018). *Wake Up and Take Over! The Effect of Fatigue on the Take-over Performance in Conditionally Automated Driving*. Paper presented at the 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Flegl, H., & Goerich, H. (1995). The European research programme PROMETHEUS and its results; Das europäische Forschungsprogramm PROMETHEUS und seine Ergebnisse.
- Fu, E., Hyde, D., Sibi, S., Johns, M., Fischer, M., & Sirkin, D. (2020). *Assessing the Effects of Failure Alerts on Transitions of Control from Autonomous Driving Systems*. Paper presented at the 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV).
- Gaspar, J., Schwarz, C., Kashef, O., Schmitt, R., & Shull, E. (2018). Using Driver State Detection in Automated Vehicles.
- Geddes, N. B. (1940). Highways and Horizons. *Magic motorways*.
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? Paper presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting.
- Gold, C., Happee, R., & Bengler, K. (2017). Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles. *Accident Analysis & Prevention*.
- Gold, C., Lorenz, L., Damböck, D., & Bengler, K. (2013). *Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. 6*. Paper presented at the Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren.

Gold, C., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bellem, H., & Jarosch, O. (2017). *Testing scenarios for human factors research in level 3 automated vehicles*. Paper presented at the International conference on applied human factors and ergonomics.

Golson, J., & Bohn, D. (2016). All new Tesla cars now have hardware for ‘full self-driving capabilities’ [Press release]. Retrieved from <https://www.theverge.com/2016/10/19/13340938/tesla-autopilot-update-model-3-elon-musk-update>

Gulde, D. (2021, Oktober 2022). Autonomes Fahren: Ist der Traum schon geplatzt? *auto motor und sport*, pp. 118-123.

Hecht, T., Feldhütter, A., Draeger, K., & Bengler, K. (2019). *What do you do? An analysis of non-driving related activities during a 60 minutes conditionally automated highway drive*. Paper presented at the International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies.

Herger, M. (2019). UPDATE: Disengagement Reports 2018 – Final Results. Retrieved from <https://thelastdriverlicenseholder.com/2019/02/13/update-disengagement-reports-2018-final-results/>

Herger, M. (2020). Disengagement Reports 2019. Retrieved from <https://thelastdriverlicenseholder.com/2020/02/26/disengagement-report-2019/>

Herger, M. (2021). Disengagement Reports 2020. Retrieved from <https://thelastdriverlicenseholder.com/2021/02/09/2020-disengagement-reports-from-california/>

Herzberger, N., Schwalm, M., & Voß, G. (2019). Erfassung der Fahrerübernahmefähigkeit im automatisierten Fahren anhand von Fahrerbeobachtungen.

Hoffmann, J., Kiesel, A., & Sebald, A. (2003). Task switches under Go/NoGo conditions and the decomposition of switch costs. *European Journal of Cognitive Psychology*, *15*(1), 101-128.

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

Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of psychology*.

Kessel, C. J., & Wickens, C. D. (1982). The transfer of failure-detection skills between monitoring and controlling dynamic systems. *Human factors*, *24*(1), 49-60.

Kiesel, A., & Hoffmann, J. (2004). Variable action effects: Response control by context-specific effect anticipations. *Psychological research*, *68*(2-3), 155-162.

Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological bulletin*, *136*(5), 849.

Kimberg, D. Y., Aguirre, G. K., & D’Esposito, M. (2000). Modulation of task-related neural activity in task-switching: an fMRI study. *Cognitive Brain Research*, *10*(1-2), 189-196.

Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of experimental psychology*, *55*(4), 352.

Koch, I. (2001). Automatic and intentional activation of task sets. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*(6), 1474.

Körber, M., Prasch, L., & Bengler, K. (2017). Why Do I Have to Drive Now? Post Hoc Explanations of Take-over Requests.

Kyriakidis, M., Happee, R., & De Winter, J. C. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 32, 127-140.

Latorella, K. A. (1996). *Investigating interruptions: an example from the flightdeck*. Paper presented at the Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting.

Logan, G. D., & Bundesen, C. (2003). Clever homunculus: Is there an endogenous act of control in the explicit task-cuing procedure? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 575.

Mattes, S., & Hallén, A. (2009). Surrogate distraction measurement techniques: The lane change test. *Driver distraction: Theory, effects, and mitigation*, 107-121.

May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 12(3), 218-224.

Mayr, U., & Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: The role of backward inhibition. *Journal of experimental psychology: General*, 129(1), 4.

Mayr, U., & Kliegl, R. (2000). Task-set switching and long-term memory retrieval. *Journal of Experimental psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 26(5), 1124-1140.

Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(6), 1423.

Meiran, N. (2000). Modeling cognitive control in task-switching. *Psychological research*, 63(3-4), 234-249.

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

Meuter, R. F., & Allport, A. (1999). Bilingual language switching in naming: Asymmetrical costs of language selection. *Journal of memory and language*, 40(1), 25-40.

Molnar, L. J. (2017). *Age-Related Differences in Driver Behavior Associated with Automated Vehicles and the Transfer of Control between Automated and Manual Control: A Simulator Evaluation*. University of Michigan, Ann Arbor.

Monsell, S., Sumner, P., & Waters, H. (2003). Task-set reconfiguration with predictable and unpredictable task switches. *Memory & cognition*, 31(3), 327-342.

Monsell, S., Yeung, N., & Azuma, R. (2000). Reconfiguration of task-set: Is it easier to switch to the weaker task? *Psychological research*, 63(3-4), 250-264.

Müller, A. L., Fernandes-Estrela, N., Hetfleisch, R., Zecha, L., & Abendroth, B. (2021). Effects of non-driving related tasks on mental workload and take-over times during conditional automated driving. *European transport research review*, 13(1), 1-15.

Müller, K. (2017). Gesetz zum automatisierten Fahren verabschiedet: Weiterhin zu wenig Rechtssicherheit für Verbraucher. Retrieved from <https://www.vzbv.de/pressemitteilungen/gesetz-zum-automatisierten-fahren-verabschiedet-weiterhin-zu-wenig>

Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2017). *A review of non-driving-related tasks used in studies on automated driving*. Paper presented at the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics.

Naujoks, F., Mai, C., & Neukum, A. (2014). The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions. *Advances in Human Aspects of Transportation: Part I*, 7, 431.

Naujoks, F., Purucker, C., Wiedemann, K., & Marberger, C. (2019). Noncritical State Transitions During Conditionally Automated Driving on German Freeways: Effects of Non-Driving Related Tasks on Takeover Time and Takeover Quality. *Human factors*, 61(4), 596-613.

Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). *ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen*. Paper presented at the 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme-FAS.

Nieuwenhuis, S., & Monsell, S. (2002). Residual costs in task switching: Testing the failure-to-engage hypothesis. *Psychonomic bulletin & review*, 9(1), 86-92.

Othersen, I., Petermann-Stock, I., Schömig, N., Neukum, A., & Fuest, T. (2017). *Cognitive Driver Take-over Capability After Piloted Driving—Method Development and Interaction with a Side Task*. Paper presented at the VDI Wissensforum GmbH (publisher), VDI Congress on Electronics in Vehicles, Bonn. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2), 230-253.

Petermeijer, S., Bazilinskyy, P., Bengler, K., & De Winter, J. (2017). Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop. *Applied Ergonomics*, 62, 204-215.

Petermeijer, S., Cieler, S., & De Winter, J. C. F. (2017). Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 218-227.

Petermeijer, S., Doubek, F., & De Winter, J. Driver response times to auditory, visual and tactile take-over requests: A simulator study with 101 participants. *Reading*, 33, 24.23.

Radlmayr, J., & Bengler, K. (2015). Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren. *FAT Schriftenreihe*, 276.

Radlmayr, J., Fischer, F. M., & Bengler, K. (2019). *The influence of non-driving related tasks on driver availability in the context of conditionally automated driving*. Paper presented at the 20th Congress of the International Ergonomics Association.

Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). *How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting.

- Reimer, B., Mehler, B., Wang, Y., & Coughlin, J. F. (2012). A field study on the impact of variations in short-term memory demands on drivers' visual attention and driving performance across three age groups. *Human factors*, 54(3), 454-468.
- Roche, F., & Brandenburg, S. (2019). Should the urgency of visual-tactile takeover requests match the criticality of takeover situations'. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.
- Roche, F., Somieski, A., & Brandenburg, S. (2018). Behavioral changes to repeated takeovers in highly automated driving: effects of the takeover-request design and the nondriving-related task modality. *Human factors*, 0018720818814963.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of experimental psychology: General*, 124(2), 207.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(4), 763.
- Ruthruff, E., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (2001). Switching between simple cognitive tasks: The interaction of top-down and bottom-up factors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(6), 1404.
- SAE. (2018). Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (J3016_201806). Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/
- Schartmüller, C., Riener, A., Wintersberger, P., & Frison, A.-K. (2018). *Workaholic: on balancing typing- and handover-performance in automated driving*. Paper presented at the Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services.
- Schartmüller, C., Weigl, K., Wintersberger, P., Riener, A., & Steinhauser, M. (2019). *Text Comprehension: Heads-Up vs. Auditory Displays: Implications for a Productive Work Environment in SAE Level 3 Automated Vehicles*. Paper presented at the Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications.
- Schneider, S. (2017). *Effects of Expectation and Driving Style on Trust in Highly Automated Vehicles*. Technische Universität München
- Schömig, N., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2020). Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren. *FAT Schriftenreihe*(324).
- Schömig, N., Wiedemann, K., Naujoks, F., Hergeth, S., Keinath, A., & Neukum, A. (2020). *How Important is the Plausibility of Test Scenarios Within Usability Studies for AV HMI?* Paper presented at the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics.
- Sohn, M.-H., & Anderson, J. R. (2001). Task preparation and task repetition: Two-component model of task switching. *Journal of experimental psychology: General*, 130(4), 764.
- Sohn, M.-H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(24), 13448-13453.
- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *The American Journal of Psychology*, 669-679.

- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6), 643.
- Synced. (2020). Tesla Rolls Out ‘Full Self-Driving’ Beta; Critics Apply the Brakes [Press release]. Retrieved from <https://syncedreview.com/2020/10/28/tesla-rolls-out-full-self-driving-beta-critics-apply-the-brakes/>
- Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., . . . Hoffmann, G. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of field Robotics*, 23(9), 661-692.
- United Nations Convention on Road Traffic, Convention on Road Signs and Signals, (1968).
- Van der Heiden, R., Iqbal, S. T., & Janssen, C. P. (2017). *Priming Drivers before Handover in Semi-Autonomous Cars*. Paper presented at the Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.
- Van der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation research part C: emerging technologies*, 5(1), 1-10.
- VDA. (2015). Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren [Press release]. Retrieved from <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>
- Verbruggen, F., Liefoghe, B., Vandierendonck, A., & Demanet, J. (2007). Short cue presentations encourage advance task preparation: a recipe to diminish the residual switch cost. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(2), 342.
- Vogelpohl, T., Vollrath, M., Kühn, M., Hummel, T., & Gehlert, T. (2016). Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung. *Berlin: GDV*.
- von der Malsburg, T. (2015). Py-Span-Task-A software for testing working memory span (2015). Zenodo.
- Walch, M., Lange, K., Baumann, M., & Weber, M. (2015). *Autonomous driving: investigating the feasibility of car-driver handover assistance*. Paper presented at the Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications.
- Wandtner, B. (2018). *Non-driving related tasks in highly automated driving-Effects of task characteristics and drivers' self-regulation on take-over performance*. (Doctoral Dissertation), University of Wuerzburg, Wuerzburg.
- Wandtner, B., Schömig, N., & Schmidt, G. (2018). Effects of Non-Driving Related Task Modalities on Takeover Performance in Highly Automated Driving. *Human factors*, 0018720818768199.
- Wickens, C. (1995). Designing for situation awareness and trust in automation. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(23), 365-370.
- Wickens, C., & Colcombe, A. (2007). Dual-task performance consequences of imperfect alerting associated with a cockpit display of traffic information. *Human factors*, 49(5), 839-850.
- Wickens, C., Dixon, S., & Ambinder, M. (2006). Workload and automation reliability in unmanned air vehicles. *Human factors of remotely operated vehicles*, 7(209-222).

- Wiedemann, K., Naujoks, F., Wörle, J., Kenntner-Mabiala, R., Kaussner, Y., & Neukum, A. (2018). Effect of different alcohol levels on take-over performance in conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention, 115*, 89-97.
- Wörle, J., Kenntner-Mabiala, R., Metz, B., Fritsch, S., Purucker, C., Befelein, D., & Prill, A. (2020). Sleep Inertia Countermeasures in Automated Driving: A Concept of Cognitive Stimulation. *Information, 11*(7), 342.
- Wörle, J., Metz, B., & Baumann, M. (2021). Sleep inertia in automated driving: Post-sleep take-over and driving performance. *Accident Analysis & Prevention, 150*, 105918.
- Wylie, G., & Allport, A. (2000). Task switching and the measurement of “switch costs”. *Psychological research, 63*(3-4), 212-233.
- Yeung, N., & Monsell, S. (2003a). The effects of recent practice on task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*(5), 919.
- Yeung, N., & Monsell, S. (2003b). Switching between tasks of unequal familiarity: The role of stimulus-attribute and response-set selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*(2), 455.
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention, 78*, 212-221.
- Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2016). Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention, 92*, 230-239.
- Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A., & Schrauf, M. (2017). Why is steering not the same as braking? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver interventions during conditionally automated driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 50*, 65-79.
- Zhang, B., De Winter, J., Varotto, S., Happee, R., & Martens, M. (2019). Determinants of take-over time from automated driving: A meta-analysis of 129 studies. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 64*, 285-307.
- Zhang, B., Wilschut, E. S., Willemsen, D. M., & Martens, M. H. (2019). Transitions to manual control from highly automated driving in non-critical truck platooning scenarios. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 64*, 84-97.