



Koordination von Übernahmemanövern beim hochautomatisierten Fahren unter Berücksichtigung der Fahrer Verfügbarkeit

Franz Albers¹ · Khazar Dargahi Nobari¹ · Jan Braun¹ · Katharina Bartsch¹ · Torsten Bertram¹

Eingegangen: 7. Januar 2021 / Angenommen: 15. September 2021 / Online publiziert: 11. Oktober 2021
© Der/die Autor(en) 2021

Zusammenfassung

Eine der zentralen Problemstellungen beim bedingt- und hochautomatisierten Fahren liegt in der Gestaltung einer sicheren und komfortablen Aufgabenübertragung zwischen dem automatisierten System und dem menschlichen Fahrer und vice versa. Dieser Beitrag stellt ein holistisches Modell zur Übergabe und Übernahme von Fahraufgaben vor, welches über eine umfassende Fahrerbeobachtung anhand von verschiedenen Sensoren und Referenzsensoren eine an den Fahrerzustand angepasste Übernahme ermöglichen soll. Konfliktsituationen zwischen Fahrer und automatisiertem System sollen unter Berücksichtigung des Fahrer- und Systemzustands über einen technisch implementierten Koordinator detektiert und gelöst werden. In einem Wizard-of-Oz Fahrversuch wird die Veränderung des sensorischen, motorischen und emotionalen Fahrerzustands, welche zentrale Komponenten des Übergabemodells bilden, anhand von zwei Fahrscenarien in Übernahme-situationen detailliert analysiert. Beobachtet werden konnten dabei leicht langsamere Reaktionen der Probanden nach Nebentätigkeiten und eine deutlich steigendes Stresslevel nach Übernahmen.

Coordination of Takeover Maneuvers in Highly Automated Driving Considering Driver Availability

Abstract

One of the central problems in conditionally and highly automated driving is the design of a safe and comfortable transition of the driving task between the automated system and the human driver and vice versa. This paper presents a holistic model for the transfer and assumption of driving tasks, which should enable a transfer adapted to the driver's condition by means of comprehensive driver observation using various sensors and reference sensors. Conflict situations between driver and automated system should be detected and solved by a technically implemented coordinator, taking into account the driver status and the system status. In a Wizard-of-Oz test drive, the change in the sensory, motoric and emotional driver state, which are central components of the transitions model, will be analyzed in detail using two takeover scenarios. Slightly slower reactions of test persons after non driving related tasks and a clearly increasing stress level after takeovers were observed.

1 Motivation

Mit der Einführung automatisiert fahrender Fahrzeuge geht das Versprechen einer zunehmend sicheren und komfortablen Mobilität einher. Während im Jahr 2019 Fehlverhalten von menschlichen Fahrzeugführern mit einem Anteil von 88,2% die mit Abstand häufigste Unfallursache bei Un-

fällen mit Personenschäden im deutschen Straßenverkehr darstellte [25], zielen aktuelle Entwicklungen für Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme darauf ab, menschliche Fahrer sowohl aus Sicherheits- als auch aus Komfortgründen zunehmend von der Fahraufgabe zu entlasten oder diese komplett zu übernehmen. Die Rollenverteilung zwischen dem menschlichen Fahrer und dem Fahrerassistenz- bzw. Automatisierungssystem beim automatisierten Fahren wird in der SAE Norm J3016 [20] durch verschiedene Stufen der Automatisierung von Level 1 (Fahrerassistenz) bis zu Level 5 (Vollautomatisierung) beschrieben. Insbesondere bei Automatisierungsstufen, bei denen die operative Fahraufgabe automatisiert vom Fahrzeug ausgeführt wird und

✉ Franz Albers
franz.albers@tu-dortmund.de

¹ Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, TU Dortmund, Dortmund, Deutschland

der menschliche Fahrer beim Erreichen einer Systemgrenze als Rückfallebene dient, kann es leicht zu problematischen Situationen während der Übergabe und Übernahme der Fahraufgabe kommen.

Da menschliche Fahrer beim Übernehmen der Fahraufgabe üblicherweise einige Momente benötigen um sich in der Verkehrssituation zu orientieren und das notwendige Situationsbewusstsein für eine sichere Fahrzeugführung zu erlangen [13], ist es von zentraler Bedeutung, dass der Fahrer währenddessen bestmöglich vom Assistenzsystem unterstützt wird, indem ihm ausschließlich hilfreiche Informationen klar und eindeutig präsentiert werden und *Mode Confusion* [6] verhindert wird. Je nach dem aktuellen Zustand und den individuellen Präferenzen des Fahrers kann dabei ein unterschiedlicher Grad der Informationsdichte und ein anderer Informationskanal zu den besten Ergebnissen führen. Vor allem in dringlichen Übernahme-szenarien werden meist multimodale Übernahmeaufforderungen bevorzugt, während in unkritischen Situationen eher ausschließlich auditive Übernahmeaufforderungen präferiert werden [4].

Der Beitrag stellt in Abschn. 2 ein Modell zur Koordination von Übernahmemanövern beim automatisierten Fahren unter Berücksichtigung der Fahrer- und Systemverfügbarkeit vor und geht dabei detailliert auf die Teilmodule des menschlichen Fahrers, der Fahrerbeobachtung und Fahrermodellierung (Abschn. 2.1), des automatisierten Systems (Abschn. 2.2) und eines neuartigen Moduls zur Koordination von Übernahmemanövern („Kordinator“, Abschn. 2.3) ein. Anschließend wird in Abschn. 3 eine Probandenstudie vorgestellt, die mit einem Wizard-of-Oz Fahrzeug (Abschn. 3.1) auf einer Teststrecke durchgeführt wurde, um insbesondere die Entwicklung des Fahrerzustands in Übernahmesituationen als Teil des Übernahmemodells zu untersuchen. In Abschn. 3.2 wird der Versuchsablauf erläutert. Die in verschiedenen Szenarien benötigten Übernahmezeiten werden für die spätere Verwendung als Zeitkonstanten im Übernahmemodell in Abschn. 3.3 analysiert. Zudem werden die gemessenen Hautleitfähigkeiten der Probanden als Indikator für das Stresslevel in Abschn. 3.4 analysiert, um Rückschlüsse auf den emotionalen Fahrerzustand zu ziehen. Abschn. 3.5 untersucht das subjektive

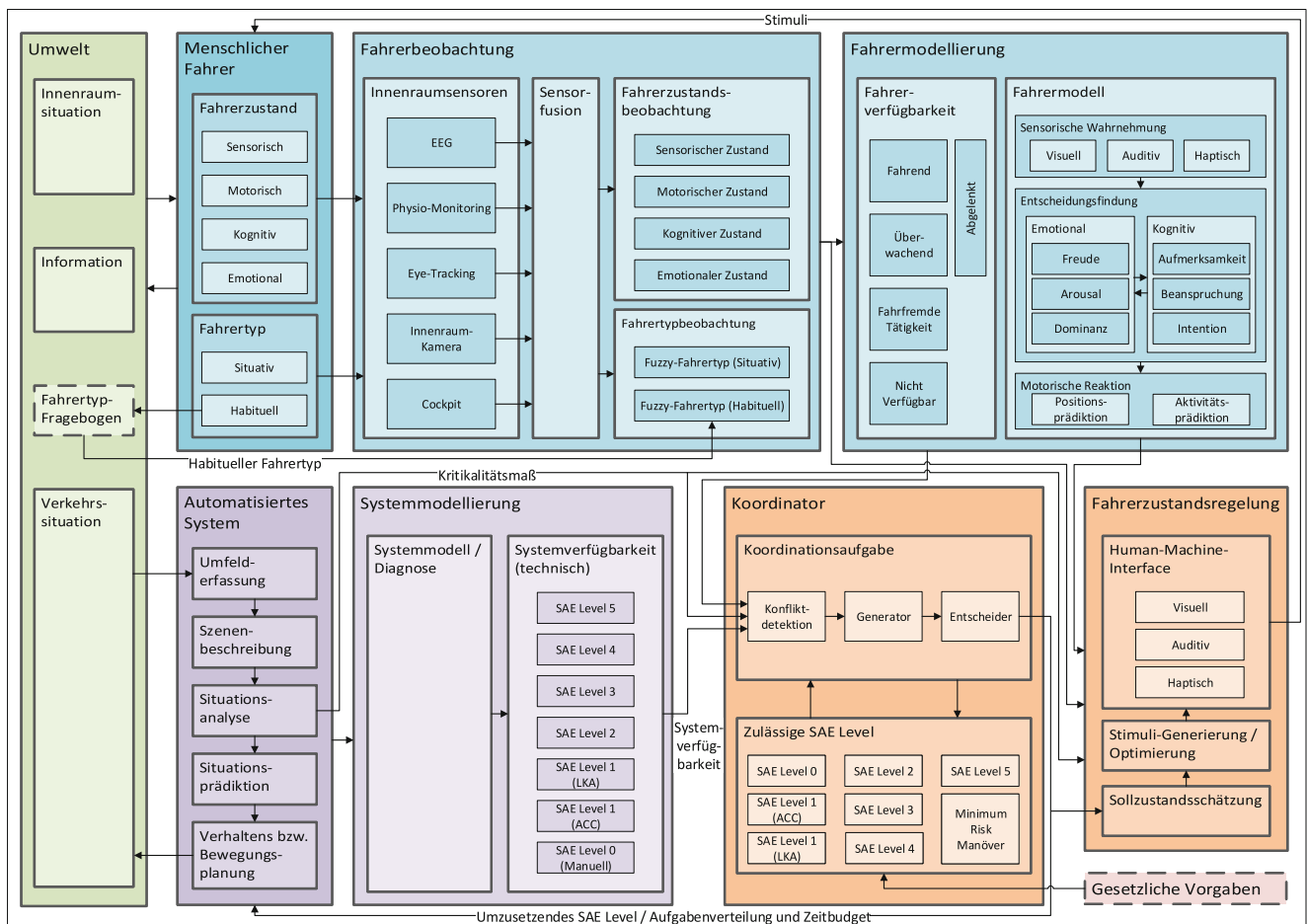


Abb. 1 Überblick über das Modell zur Beschreibung der Aufgabenverteilung und der Aufgabenübergabe und den Informationsfluss zwischen den Modulen

Realismusempfinden der Probanden während der Wizard-of-Oz Fahrt. Abschn. 4 zieht abschließend ein Fazit und gibt einen Ausblick auf weitere Schritte.

2 Modell zur Beschreibung der Aufgabenverteilung und der Aufgabenübergabe

Das entwickelte holistische Modell zur Beschreibung der Aufgabenverteilung und der Aufgabenübergabe (siehe Abb. 1) zielt darauf ab, eine umfassende Architektur für eine sichere und komfortable Übernahme der Fahraufgabe zu schaffen, geeignete Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen zu definieren und sowohl die für den objektiven Erfolg (Sicherheit) als auch für den subjektiven Erfolg (Akzeptanz) wichtigen Faktoren der Fahraufgabenübergabe abzubilden. In diesem Abschnitt wird das Übernahmemodell anhand von Abb. 1 erläutert, in der die Grundstruktur des Modells dargestellt ist.

Das Modell besteht aus Modulen für die Umwelt (in Abb. 1 grün dargestellt), für den menschlichen Fahrer, dessen Verhalten beobachtet und modelliert wird (blau), für das automatisierte System, dessen Systemverfügbarkeit über eine Diagnoseschnittstelle abgebildet wird (lila) und für den Koordinator (rot), der unter Berücksichtigung der Fahrer- und Systemverfügbarkeit und der Verkehrssituation die Einhaltung normativ-regulativer Vorgaben überprüft und über die objektive Aufgabenverteilung entscheidet. Ebenfalls rot dargestellt ist das Modul für die Fahrerzustandsregelung, welche den Fahrer im Konfliktfall durch geeignete Stimuli bzw. Informationen unterstützt. Im Folgenden werden die Teilmodule des Menschlichen Fahrers, der Fahrerbeobachtung und der Fahrermodellierung (Abschn. 2.1), des automatisierten Systems und der Systemmodellierung (Abschn. 2.2) und des Koordinators und der Fahrerzustandsregelung (Abschn. 2.3) anhand von Abb. 1 im Einzelnen erläutert.

2.1 Menschlicher Fahrer, Fahrerbeobachtung und Fahrermodellierung

Dieser Abschnitt beschreibt die in Abb. 1 in blau dargestellten Module für den menschlichen Fahrer, die Fahrerbeobachtung und die Fahrermodellierung.

Während einer Fahrt steht ein Fahrer kontinuierlich mit verschiedenen Elementen in seiner Umwelt, wie beispielsweise der Verkehrs- und Innenraumsituation, in Wechselwirkung. Auch Informationen, die den Fahrer vor oder während einer Fahrt erreichen, können ihn beeinflussen und seine Fahrweise verändern. Stimuli, mit denen ein Assistenzsystem unterstützend auf den Fahrer einwirken kann, können ebenfalls das Aufmerksamkeitslevel und die Fahrweise

eines Fahrers verändern. Das Modell geht davon aus, dass die zentralen Faktoren eines menschlichen Fahrers für das objektive und subjektive Gelingen einer Übernahme zum einen in seinem aktuellen Fahrerzustand und zum anderen in seinem Fahrertyp begründet liegen.

Der Fahrerzustand kann gemäß [14] auf der sensorischen, motorischen und kognitiven Ebene beschrieben werden. Dabei definiert der sensorische Fahrerzustand, zu welchem Grad ein Fahrer über visuelle, auditive, haptische oder vestibuläre Kanäle die aktuelle Fahraufgabe bzw. -situation erfassen kann. Der motorische Zustand gibt an, in wie weit ein Fahrer unter Berücksichtigung seiner aktuellen Körperpose in der Lage ist, durch eine motorische Reaktion auf plötzliche Veränderungen in seiner Umwelt zu reagieren. Der kognitive Zustand ist ein Maß für die aktuelle Fähigkeit eines Fahrers Reize wahrzunehmen und kognitiv zu verarbeiten. Zudem wird von Marberger et al. der motivationale Aspekt des Fahrers als wichtige Komponente bei der Übernahme der Fahraufgabe identifiziert [14]. In Erweiterung zu dem sensorischen, motorischen, kognitiven und motivationalen Zustand soll im Kontext des Übernahmемodells auch der emotionale Fahrerzustand betrachtet werden, welcher unter anderem für die Leistungsfähigkeit des Fahrers und für die Akzeptanz der automatisierten Fahrfunktionen eine Rolle spielt [5, 10]. Der emotionale Fahrerzustand steht in enger Wechselwirkung mit dem motivationalen Zustand und bildet diesen mit ab. Da Emotionen direkt die Fahrleistung beeinflussen können, wurde für eine möglichst umfassende und nicht redundante Beschreibung des Fahrers der emotionale Zustand gewählt.

Im Gegensatz zum Fahrerzustand, welcher sich stets auf den aktuellen Zeitpunkt bezieht, verändert sich der Fahrertyp auf einer längeren Zeitskala. Der Fahrertyp wird durch eine habituelle und eine situative Komponente beschrieben. Der habituelle Fahrertyp definiert, wie ein Fahrer gewöhnlicherweise ein Fahrzeug führt und umfasst den „Driving Style“ und den „Driving Skill“, welche im Hinblick auf sich verändernde Gegebenheiten beim automatisierten Fahren zu einem „Automated Driving Style“ und einem „Automated Driving Skill“ erweitert wurden [22]. Eine zentrale Rolle bei dieser Erweiterung spielt dabei die Technikaffinität eines Fahrers. Verschiedene habituelle Fahrertypen im Kontext des automatisierten Fahrens haben insbesondere in Übernahmesituationen verschiedene Ansprüche und Nutzungspräferenzen für automatisierte Fahrzeuge, welche durch das Modell berücksichtigt werden müssen. Der habituelle Fahrertyp kann beispielsweise durch einen Fragebogen (in Abb. 1 gestrichelt eingezeichnet, da es sich um eine statische Information handelt) bestimmt werden. Der situative Fahrertyp beschreibt die kurzfristige Änderung des üblichen Fahrstils aufgrund von Umgebungseinflüssen und sich verändernden Verkehrssituationen.

Aufgrund der Komplexität und Vielschichtigkeit des Fahrerzustands sind für eine umfassende Erfassung verschiedene Sensoren notwendig. Dabei können nicht alle gemessenen Signale eindeutig einer Subkomponente des Fahrerzustands zugeordnet werden. So liefern die Interaktionen eines Fahrers mit den Bedienelementen durch das Ausüben eines Lenkmoments, das Betätigen von Brems- oder Fahrpedal oder weiteren sekundären Bedienelementen erste Informationen über den motorischen und zu einem gewissen Anteil über den emotionalen Fahrerzustand. Ebenso sind beispielsweise über eine Analyse der Lenkbewegungen auch Rückschlüsse auf den kognitiven Fahrerzustand möglich [11]. Weitere Sensoren ermöglichen eine umfangreiche Erfassung des Fahrerzustands. Innenraumkameras werden oftmals zur Gesichtsdetektion, Schätzung der Kopforientierung und Augenöffnung [7] oder zur Schätzung der Körperpose und der aktuellen Nebenaktivität [15] eingesetzt. Eye-Tracking Systeme ermöglichen zudem die exakte Messung des Blickpunkts und physiologischer Größen wie des Pupillendurchmessers. Weitere physiologische Größen wie die Hautleitfähigkeit oder EEG Messungen können üblicherweise nur intrusiv erhoben werden und sind daher in Serienfahrzeugen nicht einsetzbar. In der Human-Factors-Forschung sind diese Referenzmessungen wertvolle Indikatoren für tiefere Untersuchungen des Fahrerzustands bzw. des menschlichen Bewusstseins und für eine Weiterentwicklung nicht-intrusiver Methoden der Fahrerzustandsbeobachtung. Da die verschiedenen Sensoren jeweils Informationen über unterschiedliche Komponenten des Fahrerzustands messen, werden diese zunächst fusioniert, um anschließend die jeweiligen Zustände über eine Klassifikation zu rekonstruieren.

Durch eine längerfristige Beobachtung des Fahrverhaltens kann zudem der Fahrertyp identifiziert werden. Bisherige Methoden aus der Literatur zielen dabei überwiegend auf den Fahrstil ab [16]. Ebenso ist unter zusätzlicher Berücksichtigung der bereits fusionierten Daten der Fahrerbeobachtung die Schätzung des Fahrertypen im Kontext des automatisierten Fahrens denkbar.

Um basierend auf diesen Messungen die Entscheidung treffen zu können, ob der Fahrer aktuell die Fahraufgabe auf einem bestimmten SAE Level ausführen kann und darf, wird die Abstraktionsebene der Fahrer Verfügbarkeit eingeführt, welche sich an [24] orientiert. Die Fahrer Verfügbarkeit wird durch eine Klassifikation anhand des Fahrerzustands bestimmt.

Das Übernahmmodell umfasst ein Fahrermodell, das gemäß der psychologischen Funktionsweise der menschlichen Informationswahrnehmung mit parallel ablaufenden emotionalen und kognitiven Prozessen aufgebaut ist [1, 17, 18]. Die Fahrermodellierung wird zur Generierung von optimalen Stimuli zur Unterstützung des Fahrers gemäß dem aktuellen Fahrerzustand verwendet [9]. Das Fahrermodell

besteht aus der sensorischen Wahrnehmung, der Entscheidungsfindung und einer erwarteten motorischen Reaktion. Die einzelnen Komponenten des Fahrermodells und deren Funktionsweisen werden in [10] detailliert beschrieben.

2.2 Automatisiertes System und Systemmodellierung

In diesem Abschnitt werden die in Abb. 1 in lila dargestellten Module für das automatisierte System und die Systemmodellierung erläutert.

Im Gegensatz zum menschlichen Fahrer steht das automatisierte System (Fahrzeug) vorwiegend mit der Verkehrssituation und weniger mit anderen Einflüssen, wie zum Beispiel mit dem Beifahrer oder anderen Fahrzeuginsassen, in Wechselwirkung. Die Verkehrssituation wird durch verschiedene Sensoren erfasst. Die Sensordaten werden für die Erstellung eines Umfeldmodells als Repräsentation der Umgebung fusioniert. Dieses Umfeldmodell wird verwendet, um die Verkehrssituation zu analysieren und die zukünftige Entwicklung dieser über einen kurzen Zeitraum zu präzisieren. Anhand dessen werden Kritikalitätsmaße für die jeweilige Verkehrssituation (wie beispielsweise die Time To Collision) definiert, welche von dem Koordinator bei der Überwachung und Regelung der Aufgabenverteilung berücksichtigt und von der Fahrerzustandsregelung für die Generierung von an die Kritikalität der Verkehrssituation angepassten Stimuli verwendet werden. Unter Verwendung des Umfeldmodells und der präzisierten Entwicklung der Verkehrssituation wird ein Manöver und die zugehörige Trajektorie für das Ego-Fahrzeug (Bewegungsverhalten) geplant, welches anschließend über die Fahrzeugregelung (Antrieb, Bremse, Lenkung) umgesetzt wird.

Das Übernahmmodell nimmt an, dass das automatisierte System über eine Diagnoseschnittstelle verfügt, welche die Systemverfügbarkeit liefert. Die Systemverfügbarkeit definiert, ob eine Fahrt gemäß der jeweiligen SAE Level technisch möglich ist bzw. im Rahmen der präzisierten Verkehrssituation möglich bleibt. Kann beispielsweise kein Fahrkorridor detektiert werden, so ist keine automatisierte laterale Fahrzeugführung möglich. Eine Aufgabenverteilung, bei der das System diese ausführen müsste (Lane Keeping Assistent (LKA) oder SAE Level 2 und höher) würde demnach zu einem Konfliktfall führen.

2.3 Koordinator und Fahrerzustandsregelung

Dieser Abschnitt erläutert die in Abb. 1 in rot dargestellten Module für den Koordinator und die Fahrerzustandsregelung.

Das Modell zur Aufgabenverteilung und Aufgabenübernahme geht davon aus, dass der Übergabeprozess von Fahraufgaben zwischen dem menschlichen Fahrer und dem Fah-

rerassistenzsystem nicht ausschließlich zwischen den beiden unmittelbar beteiligten Instanzen verhandelt werden kann, da das automatisierte System in der Regel keine und der menschliche Fahrer lediglich kondensiert dargestellte Informationen über den Zustand bzw. die Verfügbarkeit der jeweils anderen Instanz besitzen. Daher schlägt dieser Beitrag ein Koordinator-Modul vor, das als „dritte Instanz“ das Zusammenspiel zwischen dem menschlichen Fahrer und dem Fahrerassistenzsystem unter Berücksichtigung der Zustände und Verfügbarkeiten der beiden Instanzen verbessert regulieren kann.

Das Übernahmepmodell orientiert sich in seiner Funktionalität an der Human Automation Collaboration Taxonomy (HACT) [8] mit den Phasen der Datengenerierung, Entscheidung und der folgenden Handlung. Bei der HACT handelt es sich um ein Modell zur Entscheidungsfindung in einem kollaborativen Mensch-Maschine-System. Dabei werden mögliche Lösungen für eine gegebene Situation von einem Generator erstellt und durch einen Entscheider evaluiert. Ein Moderator überwacht den Prozess und treibt die Entscheidungsfindung in zeitkritischen Situationen voran. In der HACT werden den drei Rollen jeweils fünf verschiedene Level der Automatisierung zugeordnet, welche zusammen den Automatisierungsgrad des Systems beschreiben.

Der Koordinator hingegen umfasst den Generator und Entscheider und entscheidet in letzter Instanz unter Berücksichtigung der Fahrer- und Systemverfügbarkeit und der gesetzlichen Gegebenheiten über die objektive Aufgabenverteilung zwischen menschlichem Fahrer und Assistenzsystem und übernimmt damit weit über die reine Moderation hinausgehende Aufgaben. Der Koordinator ist nicht Teil des operativen Betriebs, der vom menschlichen Fahrer und dem Fahrerassistenzsystem ausgeführt wird, sondern regelt das Zusammenspiel zwischen dem menschlichen Fahrer und dem Fahrerassistenzsystem, insbesondere im Fall der Übergabe – ein Aspekt der in der HACT bisher ausgespart blieb.

Der Koordinator überwacht fortlaufend den Zustand und die aktuelle Verfügbarkeit des menschlichen Fahrers und des automatisierten Systems und gleicht diese mit den die Verkehrssituation beschreibenden Parametern und den gesetzlichen Rahmenbedingungen ab. Auf dieser Grundlage kann der Koordinator bestimmte Modi der Aufgabenverteilung zulassen bzw. unterbinden, um Konflikte effizient zu lösen. In Konfliktfällen werden in Anlehnung an die HACT durch den Generator verschiedene Lösungsstrategien entwickelt. Dabei kann es sich beispielsweise um einen Wechsel des SAE Levels handeln, um den Fahrer stärker in die Fahraufgabe zu involvieren oder ihn zu entlasten. Für den Fall, dass der Koordinator in einer besonders riskanten Verkehrssituation während einer automatisierten Fahrt einem menschlichen Fahrer aufgrund von dessen aktueller Verfügbarkeit die Rolle als Rückfallebene nicht zutraut, wird stets

ein Minimum Risk Manöver in Betracht gezogen, bei dem das Fahrzeug beispielsweise am rechten Fahrbahnrand hält. Die vorgeschlagenen Konfliktlösungsstrategien werden anschließend von dem Entscheider anhand einer Kostenfunktion objektiv bewertet. Die so ermittelte vielversprechendste Strategie (bzw. Aufgabenverteilung) wird umgesetzt und dem menschlichen Fahrer gegenüber eindeutig visuell, auditiv oder auch haptisch über das Human-Machine-Interface kommuniziert. Ebenso wird die entsprechende Anforderung an das Automatisierungssystem gestellt.

Bei einer Übergabe der Verantwortung für die Fahraufgabe an den menschlichen Fahrer, soll dieser bestmöglich durch eine Fahrerzustandsregelung bei der Anpassung seines Fahrerzustands an die neue Situation unterstützt werden. Dafür wird fortlaufend anhand der aktuellen Fahrsituation und des Fahrermodells ein Sollzustand für den Fahrer geschätzt. Weicht dieser Sollzustand gravierend von dem aktuellen Fahrerzustand ab, werden die gemäß dem Fahrermodell und der erwarteten Reaktion bestmöglichen Stimuli generiert, welche dem Fahrer anschließend über ein Human-Machine-Interface in visueller, auditiver oder haptischer Modalität präsentiert werden [10].

3 Fahrversuch auf der Teststrecke

Im Folgenden werden Teile des Übernahmepmodells in einer Probandenstudie auf einer Teststrecke untersucht. Das Ziel dieser Erprobung lag in der detaillierten Analyse der motorischen, sensorischen und emotionalen Rekonfiguration des Fahrerzustands während eines Übernahmeprozesses. Dabei werden insbesondere die erforderlichen Übernahmeweiten und das gemessene Stresslevel der Probanden während der Übernahme analysiert. Die Ergebnisse können im Kontext der Übernahmepmodells für die Modellierung der motorischen und physiologischen Reaktionen von Fahrern auf Übernahmeaufforderungen genutzt werden.

3.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug dient ein Wizard-of-Oz Fahrzeug. Bei einem Wizard-of-Oz Fahrzeug wird der Proband instruiert, dass es sich um ein automatisiert fahrendes Fahrzeug handelt. Tatsächlich wird das Fahrzeug von einem hinter einer Trennwand verborgenen menschlichen Fahrer verantwortlich („Driving Wizard“) geführt [23]. Aufgrund des verborgenen menschlichen Fahrers, der dem Probanden gegenüber als nur im Notfall eingreifender Sicherheitsfahrer vorgestellt wird, handelt es sich bei diesem Fahrversuch um keine tatsächlich automatisierte Fahrt. Für den Probanden ergibt sich jedoch die Illusion einer automatisierten Fahrt. In der Human-Factors-Forschung werden Wizard-of-Oz Fahrzeuge eingesetzt, um die Reaktionen von Proban-

den auf noch nicht serienreife Fahrerassistenzfunktionen zu untersuchen.

Der Umbau zum Wizard-of-Oz Fahrzeug erfolgte in Anlehnung an die RRADS Plattform [2] und ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Für den Probanden (grün dargestellt) ergibt sich so der Eindruck in einem rechtsgelenkten Fahrzeug zu sitzen. Dabei wurde ein mit zahlreichen Sensoren zur Umfelderkennung (LiDAR, 6 Kameras für eine 360° Rundumsicht, hochgenaues kinematisches DGPS, Mobileye Serienfrontkamera) ausgerüstetes Versuchsfahrzeug (siehe Abb. 3a) mit einem zweiten Lenkrad und der entsprechenden Pedalerie auf der Beifahrerseite ausgestattet (siehe Abb. 3b). Zudem ist der Fahrersitz des Probanden mit einem Kombiinstrument und zwei Innenraumkameras ausgestattet. In Abb. 3b ist zudem die Trennwand zu sehen, die zwischen dem Driving Wizard und dem Probanden installiert ist. Die Trennwand ist so geschnitten, dass der Driving Wizard und der Proband jeweils, ohne sich gegenseitig wahrzunehmen, die komplette Windschutzscheibe sehen können.

Die Illusion einer automatisierten Fahrt wird durch den Dachaufbau des Forschungsfahrzeugs mit den Sensoren für die Umfelderkennung und die Rechentechnik im Kofferraum unterstützt. Zudem wird im Gegensatz zur ursprünglichen RRADS Plattform der Lenkradwinkel über den CAN-Bus des Fahrzeugs dekodiert und als Sollwert für einen Lenkradregler verwendet. Während einer automatisierten Fahrt wird das Lenkrad des Probanden somit dem eigentlichen Lenkrad in Echtzeit nachgeführt. Ebenso werden die CAN Signale für Blinker und Geschwindigkeit dekodiert und auf dem Kombiinstrument des Probanden dargestellt.

Der Versuchsleiter (*Interaction Wizard*, blau in Abb. 2) befindet sich während der Fahrt auf dem Rücksitz und dient dem Probanden während des gesamten Fahrversuchs als Ansprechpartner. Vor dem Fahrversuch wird der Proband instruiert, dass auf dem eigentlichen Fahrersitz ein Sicherheitsfahrer sitzt, der lediglich in Notfallsituationen eingreift. Die installierte Trennwand wird dem Probanden gegenüber mit Ablenkungen durch den Sicherheitsfahrer begründet, welche bereits in vorherigen Fahrversuchen beobachtet worden seien.

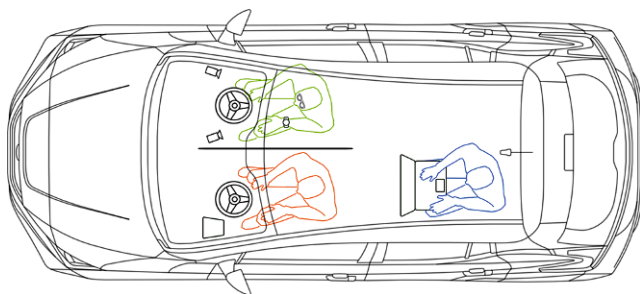


Abb. 2 Wizard-of-Oz Versuchsaufbau, angelehnt an [2]

Die Übergabe der Fahraufgabe an das automatisierte System bzw. die Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen erfolgt über einen Knopf am Lenkrad. Als Weiterentwicklung zur RRADS Plattform [2] ermöglicht das Versuchsfahrzeug nicht nur die Illusion einer automatisierten Fahrt, sondern zudem die Nachstellung einer zeitweiligen Übernahme der Fahraufgabe durch den Probanden. Im Falle einer Übernahmeaufforderung bezüglich der Fahraufgabe kann der Proband entweder durch Betätigen des Knopfes für automatisierte Fahrfunktionen, durch Betätigen des Brems- bzw. Fahrpedals oder durch einen Eingriff ins Lenkrad, welcher von einem Lenkradwinkelbeobachter erkannt wird, die Fahraufgabe übernehmen. In diesem Fall werden dem Driving Wizard die Deaktivierung der automatisierten Funktionen sowie der Lenkwinkel, die Brems- und Fahrpedalstellungen des Probanden auf einer grafischen Nutzeroberfläche im Sichtfeld angezeigt. Damit ist er in der Lage die Eingabe entsprechend zu tätigen und eine manuelle Fahrt des Probanden umzusetzen. Eine Einschränkung des Erlebnisses stellt dabei die Reaktionszeit des Driving Wizards dar, welche durch eine vordefinierte Streckenführung und Übung minimiert wurde.

Zur Fahrerbeobachtung (Probanden) werden eine *Tobii Pro Glasses 2* Eye-Tracking Brille¹ mit dem *TobiiGlassesPyController*² [26] für die Erfassung des Blickpunktes, ein *Empatica E4* Physio Armband³, mit dem die galvanische Hautleitfähigkeit, Herzfrequenz und die Hauttemperatur des Probanden erfasst werden, und zwei *Intel RealSense D435* Kameras⁴ eingesetzt. Mithilfe des OpenFace Toolkits [3] werden zudem die Gesichtsausdrücke des Probanden während der Übernahme in den Kamerabildern erfasst.

Als grundlegendes Framework für die Kommunikation der einzelnen Module der Fahrerbeobachtung, Umgebungserfassung und Versuchssteuerung wird das Robot Operating System (ROS) verwendet. Das ROS Framework ermöglicht für eine spätere Analyse zudem die synchrone Datenaufzeichnung aller Sensordaten im *rosvbag* Format⁵.

Der durchgeführte Fahrversuch ist auf die Untersuchung des Verhaltens und der physiologischen Reaktionen von Probanden auf Übernahmeaufforderungen nach einer automatisierten Fahrt ausgerichtet. Eine direkte Bewertung der Fahrerleistung nach der Übernahme, wie beispielsweise anhand der Standardabweichung der lateralen Posi-

¹ Tobii Pro Glasses 2

(www.tobii.com/de/produkte/tobii-pro-glasses-2).

² TobiiProGlassesPyController Github repository ([www.github.com/ddetommaso/TobiiGlassesPyController](https://github.com/ddetommaso/TobiiGlassesPyController)).

³ Empatica E4 (www.empatica.com/en-eu/research/e4/).

⁴ Intel Realsense D435 (www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/).

⁵ rosvbag Dokumentation (<http://wiki.ros.org/rosvbag>).

Abb. 3 Versuchsfahrzeug: Elektrisch angetriebener Nissan Leaf. **a** Versuchsfahrzeug mit Dachaufbau, **b** Fahrersitz für den Probanden im Versuchsfahrzeug



on (SDLP) [27] oder des Takeover-Controllability-Ratings (TOC-Rating) [19], ist aufgrund der indirekten Steuerung des Versuchsfahrzeugs allerdings nicht zielführend.

3.2 Versuchsablauf

Der Fahrversuch wurde auf einer abgesperrten Teststrecke durchgeführt. Einleitend wurden die Probanden über die mit den verschiedenen Sensoren erhobenen Daten aufgeklärt und bezüglich des Versuchsablaufs instruiert. Danach erfolgte die Einverständniserklärung und ein erster Fragebogen zur Bestimmung ihrer üblichen Fahrgewohnheiten und des jeweiligen Fahrertyps im Kontext des automatisierten Fahrens [22]. Anschließend wurden die Probanden zum bereits wartenden Versuchsfahrzeug geführt, wo sie eine kurze Einführung in die Bedienung des Fahrzeugs erhielten, und mit dem Physio-Armband und der Eye-Tracking-Brille ausgestattet wurden. Vor dem Beginn der Versuchsfahrten wurde die Eye-Tracking-Brille kalibriert.

Der Versuch begann mit einer Fahrt im automatisierten Modus (Driving Wizard). Nach einigen Minuten der automatisierten Fahrt wurden zur Eingewöhnung mit dem System im Abstand von ca. 5 Minuten zwei Übernahmeaufforderungen ausgelöst, bei denen der Proband jeweils für ca. 30 Sekunden die Fahraufgabe übernahm, bevor er vom Assistenzsystem dazu aufgefordert wurde, wieder den automatisierten Modus zu aktivieren. Die Übernahmeaufforderungen erfolgten auditiv und visuell. Dabei wurden Probanden sowohl durch eine computergenerierte Stimme („Bitte jetzt die Fahraufgabe übernehmen“) als auch durch eine rot gefärbte Anzeige auf dem Kombiinstrument und ein entsprechendes Icon zur Übernahme der Fahraufgabe aufgefordert (siehe Abb. 4). Nach der Eingewöhnungsphase begannen die im Folgenden untersuchten Übernahmeszenarien. Beide Szenarien zielen darauf ab, dass die Probanden einem plötzlich auftretenden Hindernis ausweichen müssen. Die gesamte Dauer des Fahrversuchs lag bei ca. 30 Minuten.

Bei dem ersten Szenario stand hinter einer nicht einsehbaren Bergkuppe ein Hindernisfahrzeug auf der Straße und blockierte die Fahrspur, wodurch entweder ein Fahrspurwechsel oder das Abbremsen des Fahrzeugs notwen-

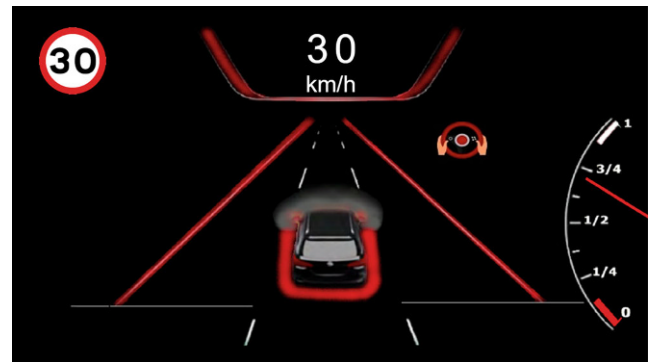


Abb. 4 Übernahmeaufforderung auf dem Kombiinstrument des Probanden. Design adaptiert nach [28]

dig wurde. Die Übernahmeaufforderung wurde in der Anfahrt zur Bergkuppe ausgelöst. Dieses Szenario soll einen für die Fahrzeugsensoren nicht einsehbaren Streckenverlauf nachbilden, weshalb die Übernahmeaufforderung notwendig wird und der Proband die Verantwortung für die Fahraufgabe übernehmen muss.

Im zweiten Szenario fuhr das Versuchsfahrzeug auf einer geraden Fahrbahn auf passive Wasserhindernisse zu, welche für den Probanden somit zunächst nicht ersichtlich waren. Die Übernahmeaufforderung erfolgte zeitgleich mit dem Auslösen der Wasserhindernisse. Auch in diesem Szenario waren die Handlungsoptionen der Probanden entweder das Abbremsen des Fahrzeugs oder ein Fahrspurwechsel zum Umfahren der Hindernisse.

Während des gesamten Fahrversuchs war die Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs auf 30 km h^{-1} (entspricht $8,33 \text{ ms}^{-1}$) begrenzt. In beiden Szenarien wurden die Übernahmeaufforderungen ca. 60 m vor der Gefahrenstelle ausgelöst, was einem Zeitbudget für die Übernahme der Fahraufgabe von ca. 7,2 Sekunden entspricht.

An dem Fahrversuch haben insgesamt 17 Probanden (10 männlich, 7 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 26,9 Jahren (23 bis 41 Jahre bei einer Standardabweichung von 4,28 Jahren) teilgenommen. Die Probanden wurden in zwei Gruppen unterteilt, welche in den beiden Szenarien jeweils unterschiedliche Tätigkeiten ausführten. Während

die eine Gruppe in dem ersten Szenario vor der Übernahmeaufforderung durch ein Spiel auf einem Tablet in eine fahrfremde Tätigkeit involviert und somit von der Fahraufgabe abgelenkt war und in dem zweiten Szenario die automatisierte Fahrt überwachte, wurden diese Tätigkeiten bei der anderen Gruppe entgegengesetzt verteilt. 4 Fahrscenarien wurden aufgrund von technischen Problemen nicht ausgewertet, wodurch sich jeweils 15 valide Versuchsfahrten mit bzw. ohne fahrfremde Tätigkeit ergeben.

Aufgrund des begrenzten Teilnehmerumfangs und der vergleichsweise jungen Probanden bildet diese Studie somit keine repräsentative Gruppe der Bevölkerung ab, ist aber dennoch für eine erste Einschätzung der Reaktionen von Probanden auf Übernahmeaufforderungen zielführend.

Nach dem Fahrversuch folgte ein zweiter Fragebogen zur Evaluation des Fahrversuchs.

3.3 Ergebnisse: Übernahmezeiten

Im Folgenden wird die von den Probanden unter den jeweiligen Randbedingungen der Fahrscenarien mit bzw. ohne fahrfremde Tätigkeit benötigte Zeit für die sensorische und motorische Rekonfiguration ihres Fahrerzustands zur Übernahme der Fahraufgabe untersucht.

Abb. 5 stellt die Histogramme der gemessenen Zeiten bis zur ersten Fixation der Straße voraus (in blau) und die dazugehörige kumulierte Verteilung (in orange) bei überwachendem Fahrer (oben) und bei Ausführung einer fahrfremden Tätigkeit (Spiel auf Tablet, unten) gesammelt für beide Szenarien dar. Für die Darstellung der Histogramme wurden die gemessenen Zeiten in Klassen mit einer Klassenbreite von jeweils einer halben Sekunde eingeteilt. Die Auswertung erfolgte manuell anhand der aufgenommenen Videos aus der Ego-Perspektive der Eye-Tracking Brille. Erwartungskonform blickte bei überwachender Tätigkeit ein Großteil der Fahrer zum Zeitpunkt der Übernahmeauf-

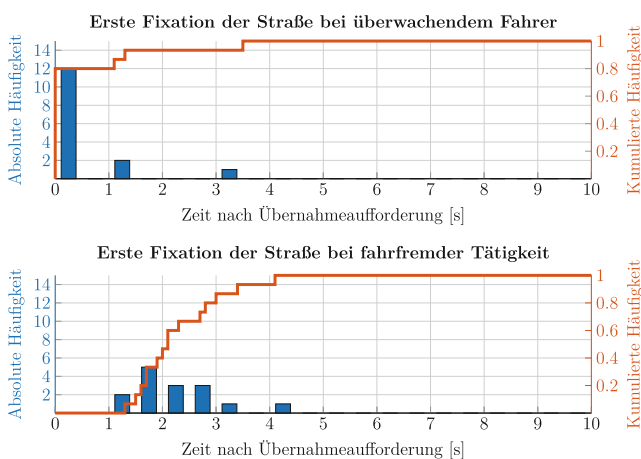


Abb. 5 Gemessene Zeiten bis zur ersten Fixation der Straße (Verkehrssituation) vor dem Fahrzeug nach der Übernahmeaufforderung

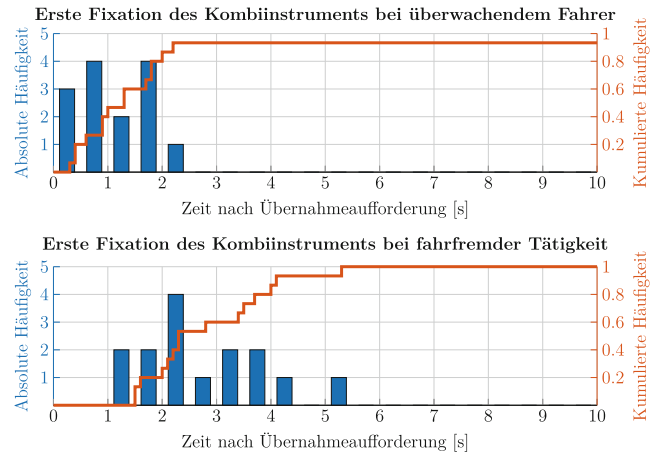


Abb. 6 Gemessene Zeiten bis zur ersten Fixation des Kombiinstruments nach der Übernahmeaufforderung

forderung auf die Straße. Lediglich drei Probanden sahen zunächst seitlich aus dem Fenster und benötigten einige Sekunden für den ersten Blick zur Verkehrssituation vor dem Fahrzeug. Der Mittelwert für den ersten Blick zur Fahrbahn lag hier bei $\mu = 0,39$ s mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,96$ s. Deutlich wird der im Schnitt fast zwei Sekunden spätere Blick zur Straße und auf die Verkehrssituation bei vorheriger Ausführung einer Nebentätigkeit ($\mu = 2,28$ s, $\sigma = 0,78$ s).

Die Zeiten bis zur ersten Fixation des Kombiinstruments, auf dem die visuelle Übernahmeaufforderung gezeigt wird, sind für die Fahrversuche in Abb. 6 in zwei Histogrammen dargestellt. Es wird deutlich, dass Probanden bei überwachender Tätigkeit deutlich früher weitere Informationen auf dem Kombiinstrument wahrnehmen können. Während die erste Fixation des Kombiinstruments bei überwachender Tätigkeit im Schnitt bei $\mu = 1,19$ s ($\sigma = 0,64$ s) lag, benötigten Probanden bei vorheriger Ausübung der fahrfremden Tätigkeit mit im Schnitt $\mu = 2,82$ s ($\sigma = 1,13$ s) deutlich länger. Mit Ausnahme von einem Probanden (im Szenario ohne Nebentätigkeit), der seine Aufmerksamkeit ausschließlich der Verkehrssituation vor dem Fahrzeug widmete, haben alle anderen Probanden in beiden Szenarien innerhalb von wenigen Sekunden die visuelle Übernahmeaufforderung auf dem Kombiinstrument fixiert. Bei überwachender Tätigkeit passierte dies stets nach dem ersten Blick zur Straße. Bei Ausübung einer Nebentätigkeit nahmen 5 Probanden die visuelle Übernahmeaufforderung vor dem ersten Blick zur Verkehrssituation wahr. 10 Probanden verschafften sich direkt nach der auditiven Warnung einen Überblick über die Fahrsituation und blickten anschließend auf das Kombiinstrument.

Nachfolgend wird die benötigte Zeit zur motorischen Rekonfiguration des Fahrerzustands untersucht. Abb. 7 zeigt die Verteilung der Zeiten, die erforderlich waren, bis der jeweilige Proband die erste Hand zum Lenkrad geführt hat.

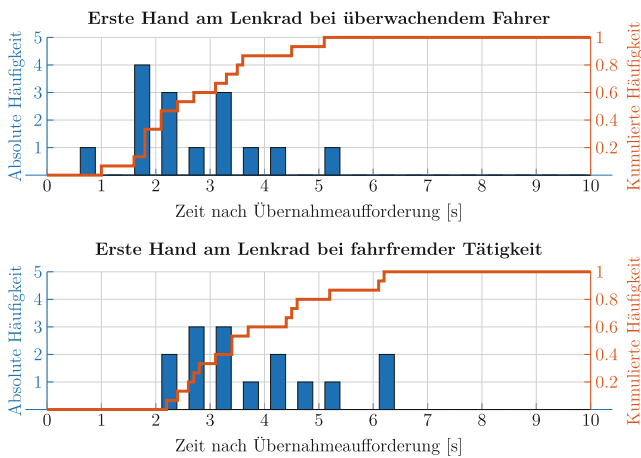


Abb. 7 Gemessene Zeiten bis zum ersten Griff an das Lenkrad nach der Übernahmeaufforderung

Ohne Nebentätigkeit benötigten die Probanden im Schnitt $\mu = 2,69\text{s}$ ($\sigma = 1,14\text{s}$), wohingegen die Probanden bei vorheriger Ausübung einer manuellen Nebentätigkeit mit durchschnittlich $\mu = 3,82\text{s}$ ($\sigma = 1,30\text{s}$) etwas länger benötigten. Dieser Unterschied ist vor allem durch das notwendige beiseite Legen des Tablets zu begründen.

Nach dem ersten Kontakt einer Hand mit dem Lenkrad nahm sich ein Großteil der Probanden vor einer ersten bewussten Lenkbewegung kurz die Zeit, um die Entwicklung der Verkehrssituation zu beobachten und eine Entscheidung für die Reaktion zu treffen. Die Verteilung der Zeiten bis zur ersten bewussten Lenkbewegung, welche ab einem Lenkradausschlag von mehr als 2° angenommen wird, ist in Abb. 8 dargestellt. Im Mittel erfolgte die erste Lenkreaktion in den Fahrversuchen bei überwachender Tätigkeit nach $\mu = 3,09\text{s}$ ($\sigma = 1,55\text{s}$) und bei vorheriger fahrfreudiger Tätigkeit nach $\mu = 5,61\text{s}$ ($\sigma = 2,27\text{s}$).

In Abb. 9 ist die Verteilung der Zeiten bis zum ersten Betätigen der Bremse bzw. des Fahrpedals dargestellt.

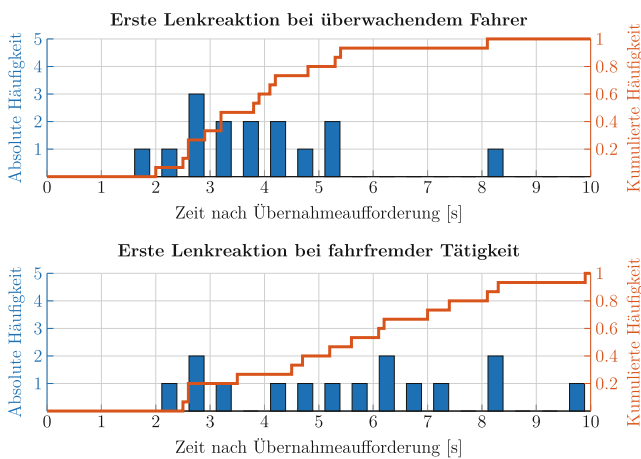


Abb. 8 Gemessene Zeiten bis zur ersten Lenkreaktion nach der Übernahmeaufforderung

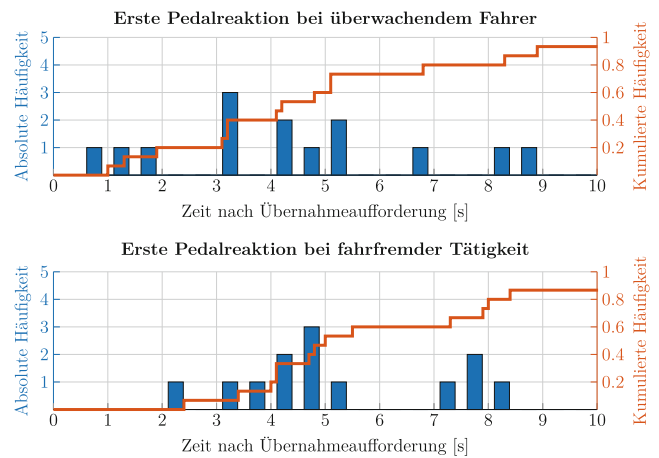


Abb. 9 Gemessene Zeiten bis zum ersten Betätigen der Bremse oder des Fahrpedals nach der Übernahmeaufforderung

Zwischen den Reaktionszeiten der überwachenden Fahrer ($\mu = 5,08\text{s}$, $\sigma = 3,63\text{s}$) und den Reaktionszeiten nach einer fahrfreudigen Nebentätigkeit ($\mu = 5,51\text{s}$, $\sigma = 3,07\text{s}$) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Bei überwachender Tätigkeit betätigten fünf Fahrer zunächst die Bremse (durchschnittlich nach $2,1\text{s}$), neun Fahrer verwendeten direkt das Fahrpedal (im Schnitt nach $5,49\text{s}$). Nach der Ausführung einer Nebentätigkeit nutzten sieben Fahrer zunächst die Bremse (durchschnittlich nach $5,17\text{s}$) und sechs Fahrer das Fahrpedal (im Schnitt nach $5,57\text{s}$). In den übrigen drei Fällen wurden die Pedale nicht in den ersten 10 Sekunden nach der Übernahmeaufforderung betätigt.

Ein Überblick über die zuvor detaillierter beschriebenen sensorischen und motorischen Reaktionen der Probanden ist in Abb. 10 durch die kumulierten Häufigkeiten der beobachteten Reaktionen dargestellt. Deutlich werden die üblichen zeitlichen Abfolgen der Reaktionen während des Übernahmeprozesses. Zumeist führt der erste Blick nach der Übernahmeaufforderung zur Straße und zur Verkehrs-

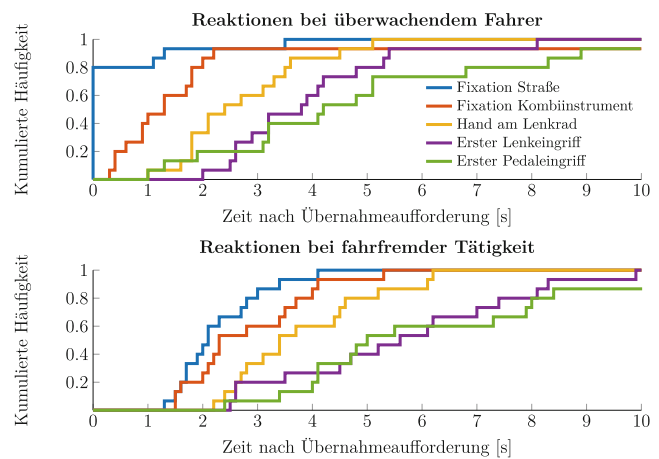


Abb. 10 Überblick über die motorischen und sensorischen Reaktionen der Probanden nach Übernahmeaufforderungen

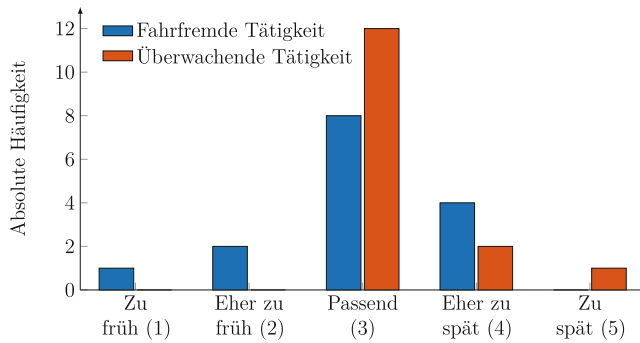


Abb. 11 Subjektive Selbsteinschätzung der Probanden bezüglich der Zeitpunkte der Übernahmeaufforderungen bei vorheriger fahrfremder und überwachender Aktivität

situation, gefolgt von einem Blick zum Kombiinstrument. Anschließend erfolgt üblicherweise der Griff zum Lenkrad. Zwischen erstem Lenk- und Pedaleingriff ist keine eindeutige Reihenfolge zu erkennen, wobei sich tendenziell überwachende Fahrer zunächst eher für den Lenkeingriff entscheiden als Probanden, die zuvor mit einer fahrfremden Tätigkeit abgelenkt waren. Ein Vergleich der beiden Ergebnisdarstellungen zeigt die leicht längere Reaktionszeit bei vorheriger fahrfremder Tätigkeit.

Im Anschluss an die Fahrscenarien wurden die Probanden in einem Fragebogen unter anderem hinsichtlich ihrer subjektiven Selbsteinschätzung bezüglich des Zeitpunkts der zuvor erlebten Übernahmeaufforderung befragt. Abb. 11 zeigt die Ergebnisse auf die Frage: „War der Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung im jeweiligen Szenario passend gewählt?“ Trotz der zuvor gezeigten leicht größeren Zeiten, die bis zur motorischen und sensorischen Rekonfiguration im Falle einer Übernahmeaufforderung mit vorheriger fahrfremder Tätigkeit benötigt wurden, zeigen

die Selbsteinschätzungen der Probanden im Mittel keine gravierenden Unterschiede zwischen den beiden Fahrscenarien. In beiden Fällen schätzte ein Großteil der Probanden den Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung (ca. 7 s vor Erreichen der Gefahrenstelle) als passend ein. Während bei vorheriger überwachender Tätigkeit einige Probanden die Übernahmeaufforderung als eher zu spät oder zu spät empfanden ($\mu = 3,27$, $\sigma = 0,59$), war die Einschätzung der Probanden nach vorheriger fahrfremder Tätigkeit weniger eindeutig ($\mu = 3,00$, $\sigma = 0,86$), was die teilweise unterschiedlichen Präferenzen der verschiedenen Fahrer zeigt.

3.4 Physiologische Ergebnisse

Als Indikator für das individuelle emotionale Stresslevel während des Fahrversuchs wurde die galvanische Hautleitfähigkeit mit einem *Empatica-E4* Physio Armband bei einer Abtastfrequenz von 4 Hz am Handgelenk der Probanden gemessen. Die Zeitreihen der gemessenen galvanischen Hautleitfähigkeit von vier exemplarisch ausgewählten Probanden (zwei Frauen, zwei Männer) sind für die Fahrscenarien mit überwachender Tätigkeit in Abb. 12a und für die Szenarien mit fahrfremder Tätigkeit in Abb. 12b für einen Zeitraum von 100 Sekunden vor und nach der Übernahmeaufforderung dargestellt. Die Daten stammen von vier Probanden, welche zunächst das Szenario mit fahrfremder Tätigkeit und anschließend das Szenario mit überwachender Tätigkeit fuhren. Die so gegebene Vergleichbarkeit der Daten begründet auch die Auswahl der Probanden für die Darstellung. Die grün gestrichelte Linie gibt den Zeitpunkt der visuellen und akustischen Übernahmeaufforderung an ($t = 0$ s). In beiden Abbildungen handelt es sich um die gleichen vier Probanden.

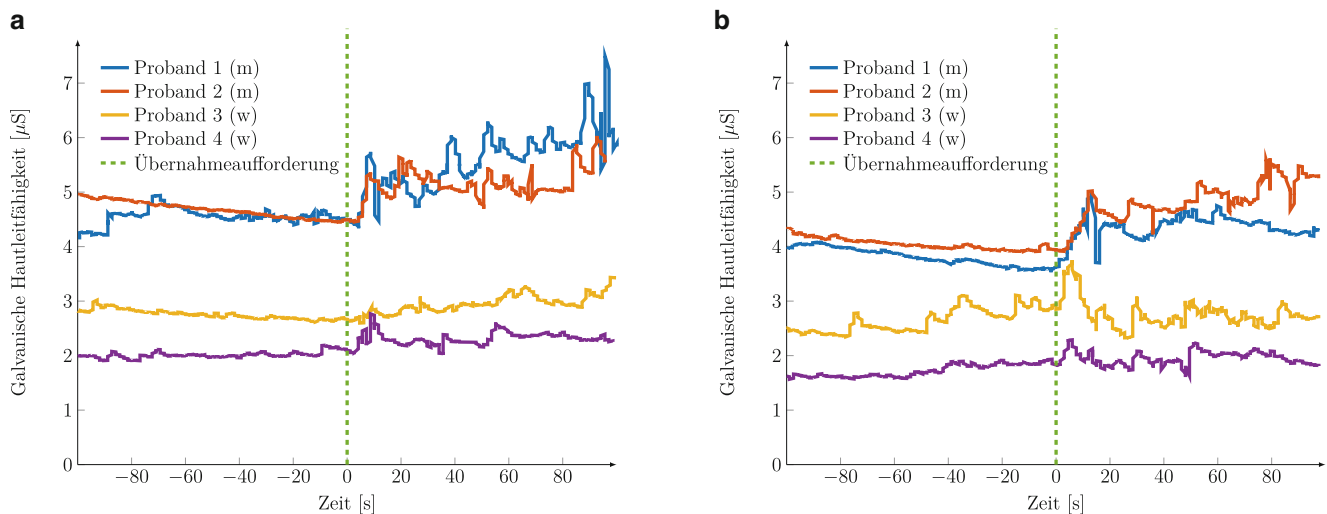


Abb. 12 Galvanische Hautleitfähigkeit verschiedener Probanden vor und nach der Übernahmeaufforderung. **a** Bei vorheriger überwachender Tätigkeit, **b** Bei vorheriger fahrfremder Tätigkeit

Abb. 12a zeigt die gemessene galvanische Hautleitfähigkeit bei Fahrern, welche bis zur Übernahmeaufforderung aufmerksam die Umgebung überwachten. Bis zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung weisen die Werte eine relativ geringe Varianz auf, die Werte der Probanden 2 und 3 weisen zudem eine leicht abfallende Tendenz auf. Kurz nach der Übernahmeaufforderung steigt die Hautleitfähigkeit bei drei der vier Probanden innerhalb von ca. 10 s signifikant um ca. 20–30 %. Die Hautleitfähigkeit von Proband 3 zeigt zu diesem Zeitpunkt lediglich geringere Ausschläge.

Auch im Falle einer fahrfremden Tätigkeit (Abb. 12b) zeigt der Verlauf der gemessenen Hautleitfähigkeit vor der Übernahme relativ konstante Werte. Die Hautleitfähigkeit von Proband 3 zeigt einige kleinere Ausschläge, welche nach Analyse des Bildmaterials der Innenraumkameras durch eine Belohnung im Spiel (zum Zeitpunkt $t = -78$ s), durch prüfende Blicke zur Straße ($t = -52$ s und $t = -42$ s) und durch eine vergleichsweise scharf automatisiert gefahrene Kurve ($t = -16$ s) zu erklären sind. Ähnlich wie bei überwachender Tätigkeit steigt die gemessene Hautleitfähigkeit in allen Fällen kurz nach der Übernahmeaufforderung innerhalb von 10 bis 20 Sekunden um ca. 20–40 %.

Diese Ergebnisse sind konsistent mit den erhobenen Daten der weiteren Probanden und zeigen das deutlich steigende Stresslevel der Probanden im Falle einer plötzlichen Übernahmeaufforderung. Auch in einer zuvor durchgeführten Studie in einem statischen Fahrsimulator konnten sprunghafte Anstiege der Hautleitfähigkeit kurz nach der Übernahmeaufforderung beobachtet werden.

3.5 Subjektive Wahrnehmung der Wizard-of-Oz Fahrt

Ein wichtiger Aspekt bei den durchgeführten Fahrversuchen ist der empfundene Realitätsbezug der Wizard-of-Oz Fahrt, da insbesondere physiologische Reaktionen von Probanden im Falle einer als nicht realitätsnah wahrgenomme-

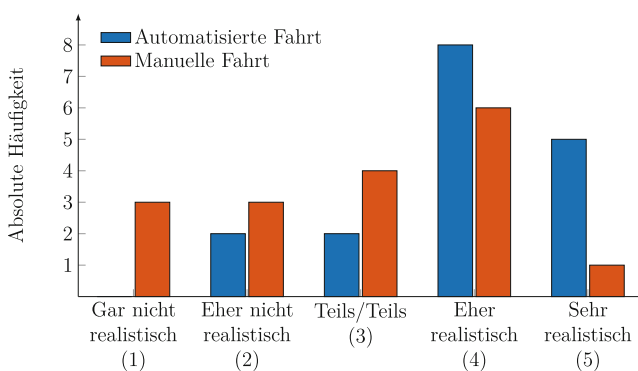


Abb. 13 Ergebnisse der Probandenbefragung nach dem Fahrversuch, wie realistisch die automatisierte bzw. manuelle Fahrt erlebt wurde

nen automatisierten Fahrt lediglich verfälscht beobachtet werden können. Abb. 13 zeigt die Ergebnisse der Probandenbefragung im Anschluss an den Fahrversuch auf die Frage „Als wie realistisch empfanden Sie die automatisierte/manuelle Fahrt?“. Beim überwiegenden Anteil der Probanden konnte das Wizard-of-Oz Fahrzeug ein eher realistisches oder sehr realistisches Gefühl einer automatisierten Fahrt vermitteln ($\mu = 3,94$, $\sigma = 0,97$). Lediglich zwei Probanden bewerteten den automatisierten Teil des Fahrversuchs als eher nicht realistisch. Die beiden Bewertungen einer eher unrealistischen automatisierten Fahrt waren nach Aussage der Probanden vor allem darin begründet, dass sie auf der eigentlichen Beifahrerseite Platz nehmen mussten und dass der Versuch auf einer Teststrecke statt im realen Straßenverkehr durchgeführt wurde. Kritischer wurde von den Probanden der manuelle Teil der Fahrt wahrgenommen. Hier ergab sich eine breite Streuung über alle Antwortoptionen ($\mu = 2,94$, $\sigma = 1,25$). Als eher nicht realistisch wurde während der manuellen Fahrt insbesondere die durch den Driving Wizard bedingte leichte Verzögerung beim Lenken und Bremsen bzw. Beschleunigen wahrgenommen. Diese Einflüsse können durch einen geübten Sicherheitsfahrer weiter minimiert jedoch vermutlich nicht komplett eliminiert werden. Ein realistisches Fahrgefühl könnte eine direkte Schnittstelle zur Lenkung mit entsprechender Ansteuerung bieten, wofür jedoch ein Fahrzeug mit Drive-by-Wire Lenkung notwendig wäre.

Acht der Probanden haben zuvor bereits eine automatisierte Fahrt in einem statischen Fahrsimulator erlebt. Diese Probanden berichteten im Anschluss an den Fahrversuch von einem deutlich stärker empfundenen Realismus während der automatisierten Fahrt im Wizard-of-Oz Fahrzeug.

4 Diskussion und Fazit

4.1 Ergebnisdiskussion

Die benötigten Zeiten für die Übernahme der Fahraufgabe nach einer automatisierten Fahrt wurden in der Wissenschaft bereits umfassend diskutiert (z. B. [12]). Oftmals stützen sich die Erkenntnisse auf Studien in Fahrsimulatoren, welche die Realität je nach Fahrsimulatortyp lediglich eingeschränkt abbilden können. Auch Übernahmezeiten aus Wizard-of-Oz Studien wurden bereits gemessen (z. B. [21]). Die vorliegende Wizard-of-Oz Studie liefert einen Beitrag zu dieser Diskussion in Form weiterer Messwerte und zeigt zudem die Selbsteinschätzungen der jeweiligen Übernahmezeiten durch die Probanden und die gemessenen Hautleitfähigkeiten einiger Probanden als Indikator für das emotionale Stresslevel während der Übernahme.

Im Vergleich mit [12] ergeben sich vergleichbare gemessene Zeiten für den ersten Blick zur Verkehrssituation und

Tab. 1 Vergleich der gemessenen Zeiten zur Rekonfiguration des Fahrerzustands mit Kuehn (2017). Die angegebenen Zeiten beziehen sich auf den Zeitpunkt, an dem jeweils 80 % aller Probanden entsprechend reagiert haben

	Kuehn et al. [12]	Diese Studie
Aufmerksame Fahrer		
Blick zur Straße	0,0s	0,0s
Blick zum Tacho	12,0s	1,8s
Hand am Lenkrad	2,0s	2,4s
Nebenaufgabe (Spiel)		
Blick zur Straße	3,0s	2,8s
Blick zum Tacho	14,2s	3,7s
Hand am Lenkrad	5,0s	4,6s

die Bewegung der Hand zum Lenkrad. Lediglich bei dem ersten Blick zum Kombiinstrument ergaben sich deutliche Abweichungen. Dies liegt vermutlich vor allem darin begründet, dass in dieser Studie die visuelle Übernahmeaufforderung direkt auf dem Kombiinstrument dargestellt wurde. Ein vergleichender Überblick der gemessenen Zeiten ist in Tab. 1 dargestellt.

Insgesamt konnten in dieser Studie wie zu erwarten war leicht verlängerte Reaktionszeiten im Falle einer vorherigen fahrfremden Tätigkeit beobachtet werden. Dies bestätigt die Erkenntnisse verschiedener anderer Autoren (z.B. [12]). Dennoch benötigten einzelne Fahrer auch bei überwachender Tätigkeit teilweise deutlich länger für die Übernahme als andere Fahrer bei vorheriger Nebenaufgabe. Dies deutet darauf hin, dass nicht allein die Art der Nebentätigkeit, sondern auch weitere Aspekte, wie beispielsweise der Fahrertyp (und damit zusammenhängend der „Automated Driving Skill“ und der „Automated Driving Style“), die benötigte Dauer der Übernahme beeinflussen.

Die galvanische Hautleitfähigkeit wird oftmals als Indikator für das Stresslevel verwendet (z.B. [29]). In dieser Studie wurde eine qualitative Analyse der galvanischen Hautleitfähigkeit einzelner Probanden vorgenommen. Die Ergebnisse deuten bei allen Probanden sowohl bei vorheriger fahrfremder als auch bei überwachender Tätigkeit auf ein deutlich gesteigertes Stresslevel nach der Übernahme hin. Dies geht aus dem plötzlichen Anstieg der Hautleitfähigkeit und zudem auch aus der gesteigerten Anzahl der Peaks der gemessenen galvanischen Hautleitfähigkeit nach der Übernahmeaufforderung hervor. Für eine optimale Leistung des Fahrers nach der Übernahme sollte der Stress auf einem niedrigen Level gehalten werden.

Die im Rahmen dieser Studie gesammelten Erkenntnisse können nicht das gesamte in diesem Beitrag vorgeschlagene Modell zur Abbildung der Aufgabenverteilung beim hochautomatisierten Fahren verifizieren und validieren, da das Modell sehr umfassend ist. Bei der Wizard-of-Oz Studie wurde der Fokus daher auf die Analyse der Rekonfiguration des Fahrerzustands gelegt. Die gesammelten Erkennt-

nisse liefern einen wertvollen Beitrag für das Fahrermodell des vorgeschlagenen Übernahmemodells und erlauben die detaillierte Modellierung der motorischen, sensorischen und physiologischen Reaktionen eines Fahrers auf Übernahmeaufforderungen. Mit der Kenntnis, wie lange ein Fahrer voraussichtlich für die Übernahme benötigt und welchen Stress diese in ihm auslösen könnte, könnten zukünftig weniger stressige und somit sicherere Übernahmeaufforderungen designt werden.

4.2 Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellte die Struktur eines holistischen Übergabemodells für Übernahme- und Übergabesituationen beim automatisierten Fahren vor. Das Modell berücksichtigt den aktuellen Fahrerzustand mit sensorischen, motorischen, kognitiven und emotionalen Komponenten. Für die Erfassung des Fahrerzustands wird aufgrund der Komplexität eine Kombination aus verschiedenen Sensoren und Referenzsensoren verwendet. Zudem umfasst das Modell Einflüsse durch den situativen und habituellen Fahrertypen für eine individuelle Anpassung der Übernahmeaufforderungen bezüglich des Fahrerzustands, Fahrertyps und der Fahrsituation. Eine zentrale Komponente des Übergabemodells stellt der Koordinator dar, welcher anhand des Fahrerzustands, Systemzustands, der aktuellen Verkehrssituation und der geltenden gesetzlichen Vorgaben Konflikte detektiert, die Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und automatisiertem System entsprechend anpasst und den menschlichen Fahrer über geeignete Stimuli unterstützt.

In einem Wizard-of-Oz Fahrversuch wurden Teile des Übergabemodells untersucht. Dabei lag der Fokus auf der detaillierten Analyse des motorischen, sensorischen und emotionalen Fahrerzustands in Übernahmesituationen. Die Ergebnisse können für die Modellierung der Reaktionen von Fahrern auf Übernahmeaufforderungen verwendet werden.

Für die Erprobung von Übernahmesituationen im Fahrversuch wurde die RRADS Plattform [2] für Human Factors Untersuchungen beim automatisierten Fahren um die Möglichkeit zur Übernahme der Fahraufgabe durch den Probanden erweitert. Die erlebten automatisierten Fahrten im Wizard-of-Oz Fahrzeug wurden deutlich realistischer als vorherige Fahrten im statischen Fahrsimulator bewertet.

4.3 Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurden einzelne Aspekte des Übergabemodells mit Ergebnissen aus Fahrversuchen beleuchtet und erste Daten für die Fahrermodellierung gesammelt. Andere Aspekte, wie beispielsweise die Verwendung von adaptiv an den Fahrerzustand, den Fahrertypen und die jeweilige Fahrsituation angepassten Übernahmeauf-

forderungen wurden bisher noch nicht genauer untersucht. Diese Untersuchungen bauen auf den gezeigten Ergebnissen auf und sind für die Zukunft geplant.

Danksagung Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „MoFFa – Holistisches Modell zur Beschreibung der Aufgabenverteilung und der Aufgabenübergabe zwischen menschlichem Fahrer und Fahrerassistenzsystem beim automatisierten und vernetzten Fahren“, das durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des Forschungsprogramms „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ unter dem Förderkennzeichen 16AVF2005 gefördert wird.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Interessenskonflikte Die Autoren erklären, dass sie keine Interessenskonflikte haben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Anderson JR, Lebiere CJ (2014) The atomic components of thought. Psychology Press, Hove. <https://doi.org/10.4324/9781315805696>
- Baltodano S, Sibi S, Martelaro N, Gowda N, Ju W (2015) The rrads platform: a real road autonomous driving simulator. Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. ACM, New York, S 281–288. <https://doi.org/10.1145/2799250.2799288>
- Baltrusaitis T, Zadeh A, Lim YC, Morency LP (2018) Openface 2.0: facial behavior analysis toolkit. 13th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. IEEE, Piscataway, S 59–66 <https://doi.org/10.1109/FG.2018.00019>
- Bazilinskyy P, Petermeijer SM, Petrovych V, Dodou D, de Winter J (2018) Take-over requests in highly automated driving: a crowdsourcing survey on auditory, vibrotactile, and visual displays. *Transp Res Part F Traffic Psychol Behav* 56:82–98. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.001>
- Bosch E, Ihme K, Drewitz U, Jipp M (2019) The role of emotion recognition in future mobility visions. <https://elib.dlr.de/128510/> (AAET Automatisiertes & Vernetztes Fahren, pp. 156–173). Zugegriffen: 19 Jun 2021
- Bredereke J, Lankenau A (2002) A rigorous view of mode confusion. In: Anderson S (Hrsg) Computer safety, reliability, and security. Lecture notes in computer science, Bd. 2434. Springer, Berlin, Heidelberg, S 19–31 https://doi.org/10.1007/3-540-45732-1_4
- Busso C, Jain J (2012) Advances in multimodal tracking of driver distraction. In: Hansen JHL (Hrsg) Digital signal processing for in-vehicle systems and safety. Springer, New York, S 253–270 https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9607-7_18
- Cummings ML, Bruni S (2009) Collaborative human–automation decision making. In: Nof SY (Hrsg) Springer handbook of automation. Springer, Berlin, Heidelberg, S 437–447 https://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_26
- Dargahi Nobari K, Bartsch K, Albers F, Bertram T (2020) Driver state regulation via real-time neurofeedback in partially automated driving. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, Piscataway <https://doi.org/10.1109/itsc45102.2020.9294349>
- Dargahi Nobari K, Albers F, Bartsch K, Braun J, Bertram T (2021) Modeling driver-vehicle interaction in automated driving. In: Forschung im Ingenieurwesen, MoFFa special issue. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00547-x>
- Kountouriotis GK, Spyridakos P, Carsten OMJ, Merat N (2016) Identifying cognitive distraction using steering wheel reversal rates. *Accid Anal Prev* 96:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.032>
- Kuehn M, Vogelpohl T, Vollrath M (Hrsg) (2017) Takeover times in highly automated driving (Level 3)
- Lu Z, Coster X, de Winter J (2017) How much time do drivers need to obtain situation awareness? a laboratory-based study of automated driving. *Appl Ergon* 60:293–304. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.003>
- Marberger C, Mielenz H, Naujoks F, Radlmayr J, Bengler K, Wandtner B (2017) Understanding and applying the concept of “driver availability” in automated driving. In: Stanton NA (Hrsg) Advances in human aspects of transportation. Advances in intelligent systems and computing, Bd. 597. Springer, Cham, S 595–605 https://doi.org/10.1007/978-3-319-60441-1_58
- Martin M, Popp J, Anneken M, Voit M, Stiefelhagen R (2018) Body pose and context information for driver secondary task detection. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, Piscataway, S 2015–2021 <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500523>
- Martinez MC, Heucke M, Wang FY, Gao B, Cao D (2018) Driving style recognition for intelligent vehicle control and advanced driver assistance: a survey. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 19(3):666–676. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2706978>
- Mehrabian A (1996) Pleasure-arousal-dominance: a general framework for describing and measuring individual differences in temperament. *Curr Psychol* 14(4):261–292. <https://doi.org/10.1007/BF02686918>
- Mohr PNC, Biele G, Heekeren HR (2010) Neural processing of risk. *J Neurosci* 30(19):6613–6619. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0003-10.2010>
- Naujoks F, Wiedemann K, Schömig N, Jarosch O, Gold C (2018) Expert-based controllability assessment of control transitions from automated to manual driving. *MethodsX* 5:579–592. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.007>
- SAE International (2018) Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles (j3016). https://doi.org/10.4271/J3016_201806
- Scharfe M, Russwinkel N (2019) Towards a cognitive model of the takeover in highly automated driving for the improvement of human machine interaction. Proceedings of the 17th International Conference on Cognitive Modelling. University of Waterloo, Waterloo
- Schlüter J, Hellmann M, Weyer J (2021) Identifikation von Fahrertypen im Kontext des automatisierten Fahrens. In: Forschung im Ingenieurwesen, MoFFa special issue. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00503-9>
- Schmidt G, Kiss M, Babbel E, Galla A (2008) The wizard on wheels: rapid prototyping and user testing of future driver assis-

- tance using wizard of oz technique in a vehicle. Proceedings of the FISITA 2008 World Automotive Congress, Munich
24. Schwalm M, Herzberger ND (2018) Die Erfassung des Fahrerzustands als Voraussetzung für höher automatisierte Fahrfunktionen 12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, Walting im Altmühltal
 25. Statistisches Bundesamt (2020) Verkehrsunfälle 2019
 26. de Tommaso D, Wykowska A (2019) Tobii glasses eye-tracking: an open-source suite for using the tobii pro glasses 2 in eye-tracking studies. Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research Applications, ETRA '19. ACM, New York, S 46:1–46:5 <https://doi.org/10.1145/3314111.3319828>
 27. Verster JC, Roth T (2011) Standard operation procedures for conducting the on-the-road driving test, and measurement of the standard deviation of lateral position (SDLP). *Int J Gen Med* 4:359–371. <https://doi.org/10.2147/IJGM.S19639>
 28. Wandtner B (2018) Non-driving related tasks in highly automated driving – effects of task characteristics and drivers' self-regulation on take-over performance. Dissertation, Universität Würzburg
 29. Wintersberger P, Riener A, Schartmüller C, Frison AK, Weigl K (2018) Let me finish before i take over. Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications – AutomotiveUI '18. ACM, New York, S 53–65 <https://doi.org/10.1145/3239060.3239085>