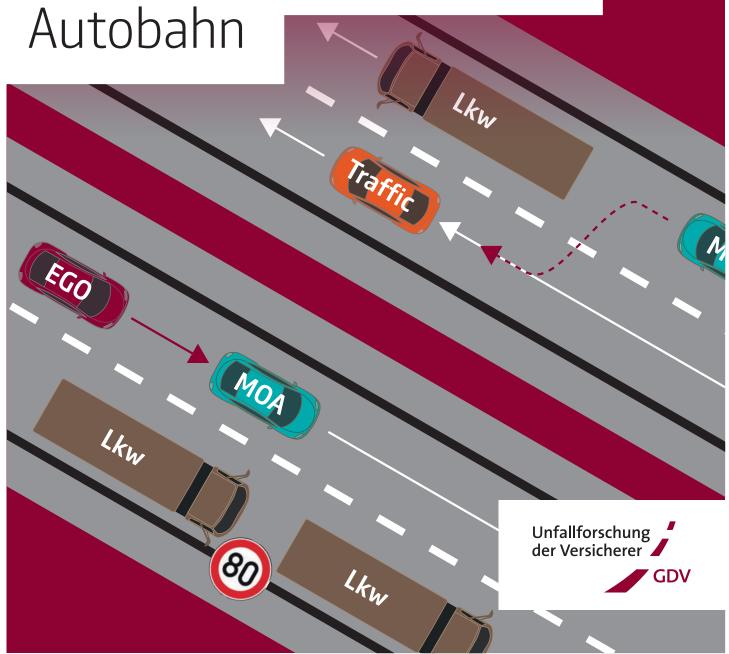
Unfallforschung kompakt Nr. 100

Hochautomatisiertes Fahren im Mischverkehr auf der



Impressum

Herausgeber

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin Postfach 08 02 64, 10002 Berlin Telefon 030 / 20 20 – 58 21, Fax 030 / 20 20 – 66 33 www.udv.de, www.gdv.de, unfallforschung@gdv.de

Redaktion

Dr.-Ing. Matthias Kühn

Realisation

pensiero KG, www.pensiero.eu

Bildnachweis

Die Nutzungsrechte der in dieser Broschüre abgebildeten Fotos liegen bei der Unfallforschung der Versicherer.

Erschienen: 08/2020



Inhalt

- 04 Einführung
- Studie 1:

 Reaktion menschlicher Fahrer
 auf hochautomatisiertes
 Fahrverhalten
- Studie 2:
 Reaktion auf hochautomatisiertes
 Fahrverhalten in Abhängigkeit von
 der Durchdringungsrate
- **Zusammenfassung**
- 17 Literatur

Einführung

Momentan bewegen sich teilautomatisierte Fahrzeuge (SAE Level 2; SAE, 2018) zusammen mit nicht-automatisierten Fahrzeugen (SAE Level 0) und assistierten Fahrzeugen (SAE Level 1) im Straßenverkehr. Beim rein manuellen Fahren liegt die Durchführung der Fahraufgabe sowie die Überwachung der Fahrumgebung beim Fahrer. Bei der Teilautomation fährt das Fahrzeug selbstständig, aber der Fahrer muss ständig die Umgebung und die sichere Fahrt des Fahrzeugs überwachen und bei Abweichungen oder Fehlern eingreifen. Ab dem Automatisierungslevel 3 (hochautomatisiertes Fahren) gibt der menschliche Fahrer die Fahraufgabe temporär an das Fahrzeug ab. Er dient jedoch als Rückfallebene für Systemgrenzen und muss bei Erreichen der Systemgrenzen die Fahraufgabe übernehmen. Die Herausforderung bei diesem Level liegt darin, von der Fahrzeugseite aus hinreichend frühzeitig zu erkennen, dass eine Übernahme notwendig ist und den Fahrer entsprechend früh dazu aufzufordern (Vogelpohl et al., 2016, 2018, 2019). Wenn diese Fahrzeuge in den nächsten Jahren in den Verkehr kommen, bewegen sich neben menschlichen Fahrern auch hochautomatisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr, wodurch ein Mischverkehr entsteht.

Hochautomatisierte Fahrzeuge (SAE, 2018) werden zunächst auf der Autobahn automatisiert fahren, wobei sich der Fahrer in dieser Zeit mit anderen Dingen beschäftigen kann. Die Fahrzeuge mit hochautomatisierten Fahrfunktionen werden wahrscheinlich ein für menschliche Fahrer ungewohntes Verhalten zeigen. Deshalb wurde die erste Studie im Fahrsimulator durchgeführt, um zu untersuchen, wie dieses ungewohnte Verhalten in typischen Interaktionssituationen von menschlichen Fahrern erlebt wird und ob sich gerade bei der Interaktion mit diesen Fahrzeugen durch dieses ungewohnte Verhalten Probleme ergeben. In der zweiten Studie wurden dann längere Fahrten mit unterschiedlichen Durchdringungsraten hochautomatisierter Fahrzeuge untersucht. Beide Studien sind ausführlich in einem Forschungsbericht beschrieben, auf den diese Unfallforschung kompakt Bezug nimmt (Stange et al. 2020). Als Vorbereitung auf diese Studien wurden zunächst Interviews mit Experten von Automobilherstellern und Zulieferern geführt, um relevante Inteaktionssituationen im Mischverkehr zu identifizieren und das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge in diesen Situationen zu spezifizieren. Dabei zeigte sich, dass sich hochautomatisierte Fahrzeuge im Gegensatz zu menschlichen Fahrern wesentlich defensiver und absolut regelkonform verhalten werden. So halten automatisierte Fahrzeuge zum Beispiel große Sicherheitsabstände ein und fahren nie schneller als die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Weiter wurde auch diskutiert, ob hochautomatisierte Fahrzeuge nach außen als solche gekennzeichnet sein sollen.

Aktuell fehlt Autofahrern in Deutschland noch jede Erfahrung im Umgang mit hochautomatisierten Fahrzeugen im Straßenverkehr. Bei den ersten Begegnungen werden damit ganz unterschiedliche Erwartungen an das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge zu finden sein, die in hohem Maße durch unterschiedlich ausgeprägte Kenntnisstände, Erfahrungen im Umgang mit technischen Systemen sowie Vertrauen in Automation geprägt sind. Längerfristig werden diese Erwartungen dann durch den Vergleich mit der Realität korrigiert. Damit ergeben sich folgende zentrale Fragen:

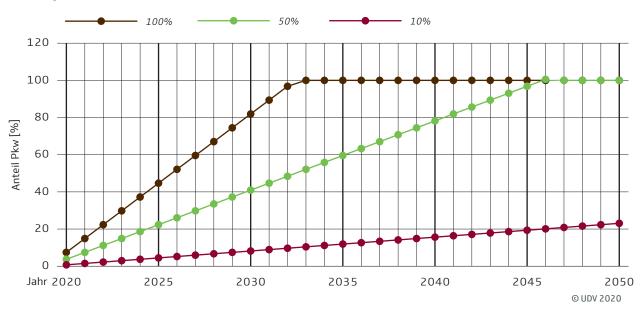
- Welches Fahrverhalten werden hochautomatisierte Fahrzeuge zeigen?
- In welchen Situationen auf der Autobahn ist dies von menschlichen Fahrern zu erleben?
- Wie reagieren diese menschlichen Fahrer auf hochautomatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr auf der Autobahn?

Geht man davon aus, dass 2020 tatsächlich die ersten hochautomatisierten Fahrfunktionen verfügbar sein werden, lässt sich die Durchdringungsrate im Verkehr abschätzen. Nach Angaben des Kraftfahrbundesamts liegt der Bestand von zugelassenen Fahrzeugen im Januar 2019 bei etwa 47 Millionen Pkw (Kraftfahrtbundesamt, 2019a). Jährlich werden etwa 3.5 Millionen Pkw neu zugelassen (Kraftfahrtbundesamt, 2019b).

Abbildung 1 zeigt den geschätzten Durchsatz in den nächsten 30 Jahren, wenn 10 Prozent, 50 Prozent oder 100 Prozent der neu zugelassenen Pkw über Hochautomation verfügen.

Geschätzter Durchsatz von Pkw mit Hochautomation in den nächsten 30 Jahren.

Abbildung 1



Experteninterviews

Da noch keine hochautomatisierten Fahrzeuge serienmäßig verfügbar sind, wurden Informationen über deren zu erwartendes Verhalten über Experteninterviews gewonnen. Es wurden N = 9 Experten aus der universitären Forschung, in Deutschland tätigen Fahrzeugherstellern und in Deutschland tätigen Automobilzuliefern befragt. Alle befragten Experten waren aktiv in der Forschung zur Fahrzeugautomatisierung tätig und deckten die Themenfelder Fahrzeugtechnik, Fahrassistenzsystementwicklung und Human Factors ab.

Die Experten waren sich einig, dass das hochautomatisierte Fahren zunächst auf ausgewählten Autobahnstrecken eingeführt werden wird, wobei vermutlich zumindest am Anfang nicht alle Situationen auf der Autobahn hochautomatisiert gefahren werden können. Die Auf- und Abfahrt wird zunächst manuell durchgeführt werden müssen. In Baustellen wird vermutlich nicht hochautomatisiert gefahren werden können. An Autobahnkreuzen hängt es von der Bauweise und der Fahrtrichtung ab, ob diese hochautomatisiert befahren werden können. In Stausituationen (bis 60 km/h) wird

man hochautomatisiert fahren können. Das Fahrzeug wird dabei auch eine Rettungsgasse bilden. Die Fahrt im Stau ist wahrscheinlich auch das Einführungsszenario für hochautomatisiertes Fahren (vgl. Wachenfeld et al., 2015). Auf Landstraßen könnte hochautomatisiertes Fahren dann möglich sein, wenn diese autobahnähnlich ausgebaut sind. Wann hochautomatisiertes Fahren in städtischen Bereichen verfügbar sein wird, konnte nicht angegeben werden. Teilweise wurde vermutet, dass hier andere Konzepte eine größere Rolle spielen könnten.

Die Geschwindigkeit wird vermutlich auf 130 km/h begrenzt sein, auch bedingt durch die Abhängigkeit von der entsprechenden Sensorik im Fahrzeug. Das Fahrzeug wird sich strikt an die zulässige Höchstgeschwindigkeit halten, wobei einzelne Experten es für möglich hielten, leichte Überschreitungen zuzulassen. Dabei wird das Fahrzeug so fahren, dass es bereits beim Passieren des Straßenschildes die Höchstgeschwindigkeit einhält. Es wird beim Aufheben der Geschwindigkeitsbegrenzung erst ab dem entsprechenden Schild beschleunigen. Hochautomatisierte Fahrzeuge müssen den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand einhalten und fahren typischerweise auf dem rechten Fahrstreifen. Sie führen

selbständig Überholmanöver aus und fahren bei sehr langsamen Fahrzeugen, die sich auf dem rechten Fahrstreifen befinden, auch auf dem linken Fahrstreifen der Autobahn. Rechtzeitig vor jedem Fahrstreifenwechsel wird geblinkt. Die Spurhaltung wird vermutlich genauer sein als die bei menschlichen Fahrern, wobei in der Mitte des Fahrstreifens gefahren wird. Die Stärke und Charakteristik von Beschleunigungen und Verzögerungen könnte innerhalb dieses Rahmens herstellerspezifisch unterschiedlich gestaltet werden. Auf der Basis dieser Beschreibung ergaben sich nur wenige Situationen, in denen das Verhalten der hochautomatisierten Fahrzeuge anders sein könnte als das menschlicher Fahrer:

- Bei Geschwindigkeitsbegrenzungen wird das hochautomatisierte Fahrzeug sehr früh verzögern und sehr spät wieder beschleunigen und sich währenddessen strikt an die Geschwindigkeitsbegrenzung halten
- Wenn sich hochautomatisierte Fahrzeuge einem langsameren Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen nähern, werden sie bereits bei einem recht großen Abstand den Überholvorgang einleiten.
- Wenn manuelle Fahrer zum Überholen vor einem hochautomatisierten Fahrzeug auf den linken Fahrstreifen wechseln, wird dieses schnell reagieren, sobald der menschliche Fahrer den Fahrstreifen gewechselt hat und einen großen Abstand zu diesem halten.
- Dies geschieht auch, wenn man als manueller Fahrer vor einem hochautomatisierten Fahrzeug auf die Autobahn fährt.

Studie 1: Reaktion menschlicher Fahrer auf hochautomatisiertes Fahrverhalten

Das Ziel der ersten Studie war es, die Reaktionen menschlicher Fahrer auf dieses andere Verhalten bzw. auf mögliche Verhaltensunterschiede zwischen hochautomatisierten und manuell gesteuerten Fahrzeugen auf der Autobahn zu analysieren. Außerdem wurde der Einfluss einer Kennzeichnung von Fahrzeugen mit hochautomatisierter Fahrfunktion untersucht.

Methodik

In der Studie wurden zwei Einflussgrößen als unabhängige Variablen untersucht. Tabelle 1 zeigt den Versuchsplan im Überblick. In diesem zweifaktoriellen Versuchsplan wurden als erste unabhängige Variable die Kennzeichnung der automatisierten Fahrzeuge variiert. In der ersten Gruppe von Probanden war keines der Fahrzeuge gekennzeichnet. In der zweiten Gruppe waren die automatisierten Fahrzeuge mit einem blauen Lichtrechteck gekennzeichnet (siehe Abb. 2), wobei die Kennzeichnung den aktuellen automatisierten Fahrmodus nach außen anzeigte. In der dritten Gruppe waren die menschlichen Fahrer als automatisierte Fahrzeuge mit dem blauen Lichtrechteck gekennzeichnet, während die automatisierten Fahrzeuge nicht gekennzeichnet waren.

Entsprechend den oben dargestellten Experteninterviews wurden dann die beschriebenen Fahrsituationen im Fahrsimulator umgesetzt. Grundlage für die Fahrsituationen war eine Autobahn mit zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Auf Basis der Experteninterviews ist man davon ausgegangen, dass sich automatisierte Fahrzeuge absolut regeltreu verhalten und eher defensiv sowie langsam fahren und große Abstände zu voranfahrenden Fahrzeugen halten. Das menschliche Fahrverhalten ist dagegen gerade in Bezug auf die Wahl von Geschwindigkeit und Abstand nicht unbedingt regeltreu und sicher. In der Regel werden vielmehr die Geschwindigkeiten leicht überschritten und zu geringe Abstände eingehalten. Entsprechend wurde das Verhalten der hochautomatisierten und menschlichen Fahrzeuge in den ausgewählten Szenarien umgesetzt.

Versuchsplan der Studie mit den beiden Faktoren Kennzeichnung und Fahrverhalten

Tabelle 1

Faktor A: Kennzeichnung	Faktor B: Fahrverhalten				
	Automatisiert Variante 1	Automatisiert Variante 2	Menschlich Variante 1	Menschlich Variante 2	
Keine Kennzeichnung	VP 1−17	VP 1-17	VP 1-17	VP 1-17	
Richtige Kennzeichnung	VP 18-32	VP 18-32	VP 18-32	VP 18-32	
Falsche Kennzeichnung	VP 33-51	VP 33-51	VP 33-51	VP 33-51	



Abbildung 2: Kennzeichnung der hochautomatisierten Fahrzeuge mit Hilfe einer lichtbasierten Markierung: Das hochautomatisierte Fahrzeug erscheint so in einem gut sichtbaren Lichtrechteck.

In der ersten Situation (SO1) fährt der Proband im Ego-Fahrzeug auf die Autobahn auf, während sich das Zielfahrzeug (MOA) auf dem rechten Fahrstreifen von hinten nähert.

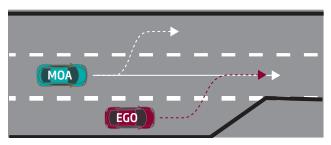


Abbildung 3: Situation 01: Vor das Zielfahrzeug auf die Autobahn auffahren.

Die zweite Situation (S02) ist der ersten Situation sehr ähnlich. Hier nähert sich der Proband im Ego-Fahrzeug einem langsam fahrenden Lkw auf dem rechten Fahrstreifen.

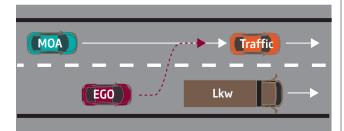


Abbildung 4: Situation 02: Zum Überholen in den Fahrstreifen vor das Zielfahrzeug wechseln

In der dritten Situation (SO3) befindet sich der Proband im Ego-Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen, um langsame Lkw zu überholen.

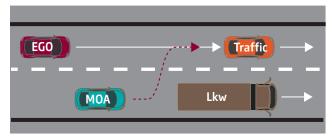


Abbildung 5: Situation 03: Zielfahrzeug zum Überholen einscheren lassen

In der vierten Situation (S04) überholt das Zielfahrzeug (MOA) eine Kolonne von langsam fahrenden Lkw, während der Proband im Ego-Fahrzeug dem Zielfahrzeug folgt.

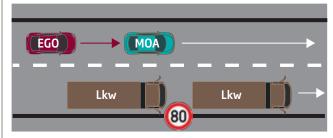


Abbildung 6: Situation 04: Folgefahrt hinter Zielfahrzeug

Ganz am Ende der Fahrt wurde bei allen Probanden noch eine Transfersituation (SO5) realisiert, in der das Ego-Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen ist, um eine Kolonne von Fahrzeugen zu überholen.

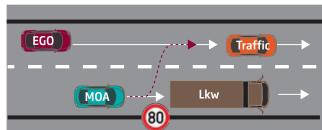


Abbildung 7: Situation 05: Transfersituation

Mittels der Experteninterviews wurden somit zwei Arten von Interaktionen im Mischverkehr auf der Autobahn identifiziert und im Simulator umgesetzt. In den ersten beiden Fahrsituationen (S01, S02) reagiert ein automatisiertes Fahrzeug bzw. ein menschlicher Fahrer auf das Fahrverhalten des Probanden im vorausfahrenden Ego-Fahrzeug. In den letzten drei Fahrsituationen (S03, S04, S05) ist es der Proband im Ego-Fahrzeug, der auf das Fahrverhalten des vorausfahrenden automatisierten Fahrzeugs bzw. des vorausfahrenden menschlichen Fahrers reagiert.

Durchführung

Für die Studie wurde der statische Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie an der Technischen Universität Braunschweig verwendet. Die Szenarien wurden mit der Simulationssoftware SILAB (Krueger et al., 2005) realisiert.

Die Fahrt begann mit einer Trainingsfahrt auf der Autobahn zur Gewöhnung an das Fahren im Fahrsimulator, welche vor allem für das Halten der Geschwindigkeit und die Spurhaltung wichtig war. Alle Probanden wurden darüber informiert, dass es um die Bewertung des Verhaltens hochautomatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu menschlichen Fahrern ginge.

Alle Probanden erhielten vor jeder Fahrsituation eine genaue Beschreibung dieser Situation, sodass sie sich ganz auf das Verhalten des Zielfahrzeugs konzentrieren konnten. Sie wurden instruiert, das eigene Fahrverhalten nur so auszuführen, dass sie sich dabei vollständig sicher fühlten.

Nach jeder erlebten Variante der Fahrsituation fuhren die Probanden auf einen Autobahnparkplatz, wo sie zur vorangegangen Situation befragt wurden. Nach dem Ende der Simulatorfahrten beantworteten die Probanden einen abschließenden Fragebogen.

Subjektive Messungen

Die Probanden bewerteten die Begegnung mit dem Zielfahrzeug nach jeder erlebten Fahrsituation. Die verschiedenen Aspekte des Verhaltens des Zielfahrzeugs (Mensch oder Automation) wurden in den definierten Situationen damit detailliert abgefragt und bewertet. Zum Abschluss der Befragung wurde nach jeder Situation erfragt, ob die Probanden das Verhalten des Zielfahrzeugs einem automatisierten Fahrzeug oder einem menschlichen Fahrer zuordnen würden. Bei der Transfersituation wurden die Probanden gefragt, ob das Zielfahrzeug in den eigenen Fahrstreifen gewechselt hätte (ja/nein) und ob man es bewusst daran gehindert hätte, den Fahrstreifen zu wechseln (ja/nein).



Abbildung 8: Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie

Objektive Messungen

In den verschiedenen Situationen wurden zwei relevanten Verhaltensaspekte untersucht. Zum einen ist das die eigene Geschwindigkeit der Probanden im Ego-Fahrzeug, und zum anderen der (minimale) Sekundenabstand (time-headway) als Indikator für die Kritikalität der Interaktion. Die Messung des Sekundenabstands bietet den Vorteil, dass dieser auch berechnet werden kann, wenn sich zwei Fahrzeuge nicht auf einem Kollisionskurs befinden, d.h. wenn ein Folgefahrzeug langsamer ist als das vorausfahrende Fahrzeug (Vogel, 2003).

Stichprobe

An der Fahrsimulatorstudie nahmen N = 51 Probanden im Alter von 20 bis 71 Jahren (M = 34,9 Jahre, SD = 15,1 Jahre, davon 22 weiblich) teil. Die Probanden besaßen den Führerschein im Durchschnitt seit 18 Jahren (SD = 15,4 Jahre). 54,9 Prozent der Probanden gaben an, mindestens mehrmals in der Woche Auto zu fahren. Weitere 17,6 Prozent fuhren mehrmals im Monat. Fast die Hälfte (49 %) der Probanden hatte eine jährliche Fahrleistung von weniger als 9000 km. 70,6 Prozent der Probanden hatten Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen.

Ergebnisse

Die Studie untersuchte die Reaktion menschlicher Fahrer auf das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge im Mischverkehr auf der Autobahn. Dabei lag der Fokus auf dem Erstkontakt menschlicher Fahrer mit diesen Fahrzeugen in ausgewählten Fahrsituationen, welche hochautomatisierte Fahrzeuge der ersten Generation vermutlich selbstständig bewältigen werden. Die ausführlichen Ergebnisse sind dem Forschungsbericht zu entnehmen (Stange et al. 2020).

Sind hochautomatisierte Fahrzeuge an ihrem Fahrverhalten für menschliche Fahrer im Mischverkehr erkennbar?

Nach jeder erlebten Situation waren die Fahrer befragt worden, ob das Fahrverhalten des anderen Fahrzeugs eher automatisiert oder menschlich gewirkt hatte. Über alle Situationen hinweg wurden das Fahrverhalten der hochautomatisierten Fahrzeuge sehr zutreffend als automatisiert erkannt. Der Unterschied war am geringsten in der Situation, in der das hochautomatisierte Fahrzeug zum Überholen vor dem Egofahrzeug in die linke Spur wechselte.

Wirkt das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge unangenehm oder gefährlich?

Nach jeder erlebten Situation wurden die Fahrer gebeten, das Verhalten der automatisiert oder vom Mensch gesteuerten Fahrzeuge insgesamt auf einer Skala zu bewerten, die von "harmlos" über "unangenehm", "gefährlich" bis zu "nicht akzeptabel" reichte.

Insgesamt erscheint das Verhalten der automatisierten Fahrzeuge teilweise etwas unangenehm, aber in keiner der Situationen gefährlich. Das Verhalten menschlicher Fahrer wird eher als gefährlich bezeichnet, z.B. wenn diese beschleunigen, um einen Spurwechsel zu verhindern oder erst sehr spät ein langsames Fahrzeug überholen.

Führt das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge zu einem risikoreichen oder gefährlichen Verhalten menschlicher Fahrer oder zu kritischen Situationen?

In zwei Situationen wechselte das eigene Fahrzeug auf die Spur vor dem hochautomatisierten Fahrzeug, einmal beim Einfädeln auf die Autobahn und zum anderen zum Überholen eines langsamen Fahrzeugs. Die hochautomatisierten Fahrzeuge reagierten hier sehr schnell und vergrößerten den Sekundenabstand, sodass dies für die menschlichen Fahrer angenehm und kooperativ erschien. Von diesem Fahrverhalten her erscheint die Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen damit eher sicherer und entspannter als mit menschlichen Fahrern, die teilweise dichter auffahren.

Die letzte Situation war eine Folgefahrt, bei der das Zielfahrzeug führte. Dabei wurde ein langsamer Lkw auf der linken Spur überholt. Gleichzeitig begann eine Geschwindigkeitsbegrenzung, die von den hochautomatisierten Fahrzeugen exakt eingehalten wurde. Bei dieser Folgefahrt erschien der mittlere Sekundenabstand unauffällig und sicher. Allerdings traten bei den hochautomatisierten Varianten deutlich geringere minimale Sekundenabstände auf. Vermutlich erscheint dieses exakte Einhalten der Geschwindigkeitsbegrenzung menschlichen Fahrern ungewöhnlich, sodass zumindest kurzzeitig sehr kleine Sekundenabstände auftauchen. Allerdings scheint dies nicht zu einem ständigen

Drängeln mit geringen Sekundenabständen zu führen, wie der mittlere Sekundenabstand zeigt.

In der Transfersituation ließen allerdings nur 20 von 51 menschlichen Fahrern die hochautomatisierten Fahrzeuge einscheren. Die restlichen Fahrer wollten vermutlich vermeiden, dass sie durch diese Fahrzeuge bei der Geschwindigkeitsbegrenzung ausgebremst werden würden. Da die Ergebnisse unabhängig von der Kennzeichnung des Fahrzeugs waren, ist allerdings eher zu vermuten, dass dies eine generelle Neigung von Fahrern ist, egal ob sie es mit langsamen vom Menschen gesteuerten oder hochautomatisierten Fahrzeugen zu tun haben. Die Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen beim Einfädeln und beim Spurwechsel erscheint vom Verhalten und den Reaktionen der menschlichen Fahrer her als insgesamt nicht gefährlich. Allerdings scheinen menschliche Fahrer nicht damit zu rechnen, dass die hochautomatisierten Fahrzeuge so exakt die Geschwindigkeitsbegrenzungen einhalten, sodass zumindest kurzfristig sehr kleine Sekundenabstände auftreten. Dies betrifft vermutlich das sehr frühzeitige Verringern der Geschwindigkeit und das exakte Einhalten der Geschwindigkeit. Sind menschliche Fahrer in einer solchen Situation unaufmerksam oder abgelenkt, könnte es durchaus zu Auffahrunfällen kommen. Im Rahmen der Studie wurde dies allerdings nicht nachgewiesen.

Ist eine Kennzeichnung hochautomatisierter Fahrzeuge zu empfehlen?

Insgesamt veränderte die zutreffende Kennzeichnung die Beurteilung des Verhaltens nur sehr wenig. Mit und ohne Kennzeichnung wurde das Verhalten meist richtig zugeordnet. Das mag dadurch begründet sein, dass das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge sich relativ deutlich von dem typischen menschlichen Verhalten in diesen Situationen unterscheidet, auch wenn es wohl noch innerhalb der Bandbreite akzeptablen menschlichen Verhaltens liegt. Interessant ist allerdings, dass die Zuordnung dann schlechter wird, wenn die Kennzeichnung falsch ist und damit scheinbar menschlich gesteuerte Fahrzeuge sich wie automatisierte Fahrzeuge verhalten und umgekehrt. Dies führt zu der Empfehlung, dass sich die Kennzeichnung von hochautomatisierten Fahrzeugen auf die Aktivierung des automatisierten Fahrmodus beziehen muss und nicht auf das Fahrzeug allgemein. Nur so kann zwischen Mensch und Maschine unterschieden werden

Studie 2: Reaktion auf hochautomatisiertes Fahrverhalten in Abhängigkeit von der Durchdringungsrate

Das Ziel der zweiten Studie war es, die Reaktion und Verhaltensanpassung menschlicher Fahrer an das Fahren im Mischverkehr in Abhängigkeit von der Durchdringungsrate hochautomatisierter Fahrzeuge auf der Autobahn zu untersuchen.

In dieser Studie absolvierten Fahrer vier längere Fahrtabschnitte mit Mischverkehr auf der Autobahn. Jeder Fahrtabschnitt hatte einen anderen Anteil an hochautomatisierten Fahrzeugen: O Prozent, 25 Prozent, 50 Prozent und 75 Prozent Durchdringungsrate. Dieses Vorgehen ermöglichte es, die zeitliche Entwicklung der Durchdringungsrate von hochautomatisierten Fahrzeugen nach der Einführung in den öffentlichen Straßenverkehr im Zeitraffer nachzuvollziehen. Ähnlich wie in der ersten Studie wurde die Anzeige des hochautomatisierten Fahrmodus mittels einer Außenkennzeichnung variiert.

Methodik

Die Studie wurde ebenfalls im statischen Fahrsimulator an der TU Braunschweig durchgeführt (siehe Abb. 8).

Es wurden zwei Einflussgrößen variiert. Die erste Einflussgröße war die Kennzeichnung hochautomatisierter Fahrzeuge, die drei Ausprägungen hatte: "Mit Kennzeichnung", "ohne Kennzeichnung" und "Kontrollgruppe ohne Information". Für die Kennzeichnung wurde analog zur ersten Studie ein blaues Lichtrechteck unter dem Fahrzeug verwendet (siehe Abb. 2). In der Kontrollgruppe wussten die Probanden nicht, dass neben menschlichen Fahrern auch hochautomatisierte Fahrzeuge auf der Autobahn unterwegs sein werden.

Als zweite Einflussgröße wurde die Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge in vier Ausprägungen in den vier Fahrtabschnitten variiert (0 % / 25 % / 50 % / 75 % Durchdringungsrate). Alle Probanden absolvierten alle vier Fahrtabschnitte. Die Probanden erlebten die Fahrtabschnitte in randomisierter Reihenfolge, um systematische Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren.

Versuchsplan der Studie 2 mit den beiden Faktoren Kennzeichnung und Durchdringungsrate

Tabelle 2

Faktor A: Kennzeichnung	Faktor B: Durchdringungsrate				
	0%	25%	50%	75%	
	Hochautomatisierte Fahrzeuge				
Mit Kennzeichnung	VP 1-17	VP 1-17	VP 1-17	VP 1-17	
Ohne Kennzeichnung	VP 18-34	VP 18-34	VP 18-34	VP 18-34	
Kontrollgruppe	VP 34-51	VP 34-51	VP 34-51	VP 34-51	

Aus diesen zwei Einflussgrößen oder unabhängigen Variablen ergab sich ein 2-faktorieller Versuchsplan, der in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt ist.

Aufbau der Autobahnabschnitte

Auf einer Autobahn mit zwei Fahrstreifen für jede Fahrtrichtung absolvierten die Probanden vier Autobahnabschnitte von jeweils 35 km Länge. In Abhängigkeit des Fahrstils der Probanden dauerten die Fahrten circa 20 bis 25 Minuten pro Autobahnabschnitt. Die Autobahnabschnitte waren hinsichtlich ihres Aufbaus identisch (Infrastruktur, Streckenführung, Geschwindigkeitsbeschränkungen). Grundsätzlich galt auf allen Fahrtabschnitten eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h, wobei in einigen Bereichen Tempolimits mit geringeren Geschwindigkeiten galten. Die Tempolimits wurden mit entsprechenden Schildern eingeführt.

Als Basis für den Aufbau der Fahrtabschnitte dienten die Aussagen der interviewten Experten und die Fahrsituationen aus der vorangegangen Studie zum Erstkontakt mit automatisierten Fahrzeugen. Dementsprechend gab es auf den Fahrtabschnitten keine baulichen Besonderheiten wie Baustellen, Autobahnkreuze oder fehlende Fahrbahnmarkierungen. Ebenso wurden keine extremen Wetterbedingungen wie z.B. Schnee, Nebel oder Starkregen in die Untersuchung einbezogen. Das

Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge und der menschlichen Fahrer im Mischverkehr wurden ebenfalls in Anlehnung an Aussagen der befragten Expertinnen analog zur ersten Studie ausgelegt.

Durchführung

In der Informationsphase wurden die Probanden in den beiden Versuchsgruppen mit bzw. ohne Kennzeichnung über den Mischverkehr mit Hilfe von Definitionen und detaillierten Erklärungen über die Fähigkeiten und Grenzen hochautomatisierter Level 3 (SAE, 2018) Fahrzeuge informiert. Auf die Informationsphase folgte eine fünfminütige Trainingsfahrt auf der Autobahn zur Gewöhnung an das Fahren im Fahrsimulator. Jeder Fahrtabschnitt dauerte circa 20 bis 25 Minuten. Die gesamte Simulatorfahrt dauerte circa 80 bis 100 Minuten.

Messung der abhängigen Variablen

Fragebogendaten

Nach jedem Autobahnabschnitt bewerteten die Probanden die vorangegangene Fahrt.

Fahrdaten

Für die gesamte Simulatorfahrt wurden die Positionen aller Fahrzeuge aufgezeichnet. Daraus wurden für jeden der zehn Teilabschnitte einer Simulatorfahrt die mittleren und minimalen Sekundenabstände des Ego-Fahrzeugs zu vorausfahrenden Fahrzeugen in der Annäherung bzw. Folgefahrt als Indikatoren für die Kritikalität von Interaktionssituationen im Mischverkehr errechnet. Die folgenden Fahrdaten wurden gemessen:

- Mittlerer Sekundenabstand
- Minimaler Sekundenabstand
- Anteil der sicherheitskritischen Interaktionen mit hochautomatisierten Fahrzeugen
- · Durchschnittliche Geschwindigkeit

Stichprobe

An der Fahrsimulatorstudie nahmen N = 51 Probanden im Alter von 22 bis 74 Jahren (M = 41,5 Jahre, SD = 18,1 Jahre, davon 22 weiblich) teil. Die Teilnehmer besaßen den Führerschein im Durchschnitt seit 23,8 Jahren (SD = 19,0 Jahre). 61 Prozent der Probanden gaben an, mindestens mehrmals in der Woche Auto zu fahren. Weitere 20 Prozent fuhren mehrmals im Monat. Etwas über die Hälfte (55 %) der Probanden hatte eine jährliche Fahrleistung von weniger als 9000 km. 78 Prozent der Probanden hatten Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Antworten auf die zentralen Fragestellungen dieser zweiten Studie dargestellt. Die ausführlichen Ergebnisse sind dem Forschungsbericht zu entnehmen (Stange et al. 2020).

Wird eine unterschiedliche Durchdringungsrate mit hochautomatisierten Fahrzeugen überhaupt erlebt?

Es zeigte sich, dass die Gruppe ohne Kennzeichnung der hochautomatisierten Fahrzeuge unabhängig von einer Durchdringungsrate zwischen 30 und 40 Prozent solcher Fahrzeuge ausging, allerdings auch in der Bedingung mit nur menschlich gesteuerten Fahrzeugen. Dies bestätigt den Befund der ersten Studie, dass das hier auf der Autobahn gezeigte Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge noch innerhalb der Bandbreite des menschlichen Fahrverhaltens liegt.

In der Gruppe mit Kennzeichnung konnten die Anteile der hochautomatisierten Fahrzeuge recht gut eingeschätzt werden. Die Kennzeichnung prägt damit sehr deutlich das Bild der menschlichen Fahrer vom Mischverkehr mit hochautomatisierten Fahrzeugen. Nur anhand des Fahrverhaltens ist für menschliche Fahrer im Mischverkehr kaum zuverlässig zu erkennen, wie viele hochautomatisierte Fahrzeuge ihnen begegnen.

Wird der Mischverkehr mit hochautomatisierten Fahrzeugen gefährlicher und unangenehmer erlebt?

Die Fahrten im Mischverkehr wurden als etwas gefährlicher und unangenehmer bewertet, wobei das Gefahrenpotenzial eher unangenehm als wirklich gefährlich erlebt wurde. Dieser Effekt war unabhängig von der Durchdringungsrate mit hochautomatisierten Fahrzeugen und zeigte sich bereits bei einer Rate von 25 Prozent hochautomatisierter Fahrzeuge.

Behindern hochautomatisierte Fahrzeuge den Verkehr auf der Autobahn?

Es zeigt sich, dass im Mischverkehr der Eindruck entsteht, etwas schlechter voranzukommen. Anstrengender wird die Fahrt allerdings nicht. Deskriptiv wird dieser Eindruck umso stärker, je höher die Durchdringungsrate ist. Allerdings ist der Unterschied so klein, dass er nicht signifikant wird. Damit scheint auch hier bereits eine Durchdringungsrate von 25 Prozent ausreichend groß zu sein, um den Verkehrsfluss zu ändern.

Verändert sich das Fahrverhalten menschlicher Fahrer im Mischverkehr auf der Autobahn?

Bei 130 km/h war der mittlere Sekundenabstand bei 50 Prozent und 75 Prozent Durchdringung signifikant kleiner, außerdem war der Prozentsatz kritischer Sekundenabstände unter einer Sekunde größer. Bei der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h traten ebenfalls bei den Durchdringungsraten 50 Prozent und 75 Prozent deutlich mehr kritische Sekundenabstände

unter einer Sekunde auf. Im Bereich der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h waren die minimalen und mittleren Sekundenabstände vor allem bei der hohen Durchdringungsrate von 75 Prozent deutlich kleiner. Da die hochautomatisierten Fahrzeuge bei der Vorgabe von 130 km/h im Durchschnitt nur 100 km/h fuhren, bestätigt sich damit die Vermutung, dass dies bei der Fahrt auf der Autobahn durch die langsamere Fahrweise und das exakte Einhalten der Geschwindigkeitsbegrenzungen menschlichen Fahrern zu langsam erscheint und so relativ dicht aufgefahren wird. Dabei entstehen vor allem bei höheren Durchdringungsraten relativ häufig sehr kleine Sekundenabstände unter einer Sekunde.

In allen drei Geschwindigkeitsbereichen fuhren menschliche Fahrer im Mischverkehr signifikant langsamer als bei rein menschlichem Verkehr. Dieser Effekt wird etwas stärker mit zunehmender Durchdringungsrate. Auch objektiv zeigt sich damit, dass sich der Verkehrsfluss durch hochautomatisierte Fahrzeuge ändert. Damit tragen diese Fahrzeuge tatsächlich dazu bei, die Geschwindigkeit zu senken, was unter Sicherheitsaspekten zunächst positiv zu bewerten ist. Allerdings scheint dies weniger ein Effekt des Modelllernens zu sein, sondern die auftretenden kleinen Sekundenabstände weisen darauf hin, dass die hochautomatisierten Fahrzeuge die menschlichen Fahrer eher behindern.

Ist eine Kennzeichnung hochautomatisierter Fahrzeuge im Mischverkehr zu empfehlen?

Weder im Erleben noch im Verhalten zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen diesen drei Gruppen. Bei der Schätzung des Anteils hochautomatisierter Fahrzeuge in den ersten beiden Gruppen war eine gute Schätzung durch die Fahrer nur mit Kennzeichnung möglich. Nur anhand des Verhaltens waren die Fahrzeuge offensichtlich nicht zuverlässig erkennbar. Bei einer fehlenden Kennzeichnung hatten zwar mehr menschliche Fahrer den Eindruck, sie könnten das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge gut erkennen. Die schlechte Schätzung des Anteils hochautomatisierter Fahrer in dieser Gruppe weist aber darauf hin, dass es sich hier

eher um einen subjektiven Eindruck bzw. subjektive Erwartungen zum Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge handelt, die nicht mit dem tatsächlichen Verhalten übereinstimmen. Zumindest in den hier untersuchten typischen Autobahnfahrten verändert eine Kennzeichnung weder das Verhalten noch das Erleben der menschlichen Fahrer im Mischverkehr.

Zusammenfassung

Die Einführung hochautomatisierter Fahrfunktionen im Pkw auf der Autobahn steht kurz bevor. Diese Einführung stellt nicht nur Passagiere im Innern eines automatisierten Fahrzeugs vor neue Herausforderungen, sondern auch menschliche Fahrer im daraus resultierenden Mischverkehr. Bislang haben menschliche Fahrer noch keine Erfahrungen im Umgang mit Hochautomation auf der Autobahn, was zu neuen möglichen Risiken für die Verkehrssicherheit auf der Autobahn führen könnte, aber auch das Verkehrsklima verändern könnte. Bei der Einführung hochautomatisierter Systeme ist somit die Betrachtung der Außenperspektive menschlicher Fahrer im Mischverkehr unabdingbar.

Beide Studien lieferten zusammenfassend folgende Antworten:

- → Das Fahrverhalten der hochautomatisierten Fahrzeuge liegt innerhalb der Bandbreite menschlichen Fahrverhaltens. Wenn man in einzelnen Situationen das Verhalten genau beobachtet und die Interaktion mit diesen Fahrzeugen erlebt, ist es allerdings den meisten Fahrern recht gut möglich, ein hochautomatisiertes Fahrzeug von einem menschlich geführten Fahrzeug zu unterscheiden.
- → Bei längeren Fahrten im Mischverkehr auf der Autobahn scheint eine gute Abschätzung, wie vielen hochautomatisierten Fahrzeugen man begegnet ist, dagegen nur schlecht möglich zu sein. Dies ist vermutlich dadurch bedingt, dass man nicht bei jedem dieser Fahrzeuge ein entsprechendes Manöver bzw. eine Interaktion mit diesem Fahrzeug erlebt.
- → Eine Kennzeichnung der hochautomatisierten Fahrzeuge ermöglicht eine recht genaue Schätzung der Durchdringungsrate und erleichtert es, das Verhalten dieser Fahrzeuge zu erlernen und zu antizipieren.

- → Das ungewohnt defensive und regeltreue Verhalten der hochautomatisierten Fahrzeuge führt in einzelnen Situationen, insbesondere bei der Folgefahrt innerhalb von Geschwindigkeitsbegrenzungen zu sehr kleinen, sicherheitsrelevanten Sekundenabständen. Diese kleineren Sekundenabstände finden sich auch bei längeren Fahrten auf der Autobahn, insbesondere bei höheren Durchdringungsraten ab 50 Prozent.
- → Diese kleinen Sekundenabstände entstehen vermutlich, weil menschliche Fahrer nicht damit rechnen, dass die hochautomatisierten Fahrzeuge so langsam und vor allem regeltreu im Hinblick auf Geschwindigkeitsbegrenzungen fahren, dabei insbesondere sehr frühzeitig verzögern, um am Schild die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu erreichen und diese dann exakt einhalten. Gerade wenn Fahrer abgelenkt oder unaufmerksam sind, könnte dies zu Auffahrunfällen führen.
- Eine Kennzeichnung hochautomatisierter Fahrzeuge wäre vor diesem Hintergrund zu empfehlen, um es menschlichen Fahren zu ermöglichen, dieses Verhalten zu antizipieren und damit das dichte Auffahren zu vermeiden. Dieser Effekt konnte allerdings bei den längeren Fahrten auf der Autobahn nicht nachgewiesen werden. Vermutlich ist hier längere Erfahrung notwendig, um entsprechende Erwartungen aufzubauen. Damit dies erlernt werden kann, ist eine Kennzeichnung aber notwendig, sodass diese Art von Verhalten auch den hochautomatisierten Fahrzeugen sicher zugeordnet werden kann. Die Kennzeichnung ist weiter notwendig, damit die Fahrer aufgrund der Kennzeichnung das Verhalten vorhersagen und ihr eigenes Verhalten anpassen können, um nicht erst auf das unerwartete Verhalten reagieren zu müssen, was vermutlich zu diesen kleinen Sekundenabständen führt.

- → Die Kennzeichnung darf allerdings nicht das Fahrzeug an sich betreffen, sondern muss anzeigen, dass sich das Fahrzeug aktuell im hochautomatisierten Modus befindet, in dem es ein bestimmtes hochautomatisiertes Verhalten zeigt. Wenn ein menschlicher Fahrer gerade fährt, sollte dies entsprechend auch von außen gut erkennbar sein, um hier nicht falsche Erwartungen zu wecken.
- In einzelnen Interaktionssituationen beim Einfädeln. Spurwechsel und Überholen wird das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge auf der Autobahn als angenehm und kooperativ erlebt und eher positiv bewertet. Selbst die genaue Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung in einer Folgefahrt wird nur als wenig ärgerlich erlebt. Bei längeren Fahrten im Mischverkehr wird allerdings bereits ab einer geringen Durchdringungsrate von 25 Prozent die Fahrt als ein wenig gefährlicher und etwas unangenehmer bewertet. Die Fahrer haben dabei den Eindruck, im Mischverkehr schlechter voranzukommen. Vermutlich werden auch die auftretenden kleineren Sekundenabstände von den Fahrern wahrgenommen, sodass der Eindruck einer etwas höheren Gefährlichkeit und einer unangenehmen Situationen entsteht. Eine Kennzeichnung der Fahrzeuge änderte diesen Eindruck nicht. Möglicherweise sind hier längerfristige Lernprozesse notwendig. Allerdings können auch diese nicht den Eindruck verhindern, gerade bei Geschwindigkeitsbegrenzungen behindert zu werden.
- → Beide Studien zeigen, dass hochautomatisierte Fahrzeuge auf der Autobahn dazu beitragen, die Geschwindigkeiten zu reduzieren und Geschwindigkeitsbegrenzungen besser einzuhalten. Beim Einfädeln, Spurwechsel und Überholen wirkt das Verhalten hochautomatisierter Fahrzeuge angenehm defensiv und kooperativ. Im Verkehrsfluss werden von menschlichen Fahrern hochautomatisierte Fahrzeuge allerdings als Behinderung erlebt, sodass die prinzipiell sicherheitsfördernde Wirkung der redu-

zierten Geschwindigkeit durch dabei entstehende sicherheitskritische Sekundenabstände verringert werden könnte. Eine entsprechende Abschätzung der Gesamtwirkung ist auf Basis der vorliegenden Studien allerdings nicht möglich. Eine Kennzeichnung des aktuellen Fahrmodus der hochautomatisierten Fahrzeuge könnte dazu beitragen, dass Fahrer das Verhalten der hochautomatisierten Fahrzeuge besser vorhersehen können, sodass die kleineren Sekundenabstände vermieden werden könnten. Dazu sind aber vermutlich längere Lernprozesse notwendig, die im Rahmen der vorliegenden Studien nicht realisiert werden konnten. Der Eindruck der Behinderung wird durch eine solche Kennzeichnung nicht aufzuheben sein. Dies könnte aber dazu beitragen, die Akzeptanz hochautomatisierter Fahrzeuge zu erhöhen, um sich damit selbst hochautomatisiert fahren zu lassen und dabei die vielleicht etwas längere Fahrzeit mit sinnvollen Nebentätigkeiten besser nutzen zu können.

Literatur

Kraftfahrtbundesamt (2019a). Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019. https://www.kba.de/ DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html

Kraftfahrtbundesamt (2019b). Jahresbilanz der Neuzulassungen 2017. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Ueberblick_archiv/2017_neuzulassungen_node.html

Krueger, H.-P., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB – a task-oriented driving simulation. Proceeding of the driving simulator conference (pp. 232-331).

Society of Automotive Engineers (2018). SAE International Releases Updated Visual Chart for Its "Levels of Driving Automation" Standard for Self-Driving Vehicles. https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-"levels-of-driving-automation"-standard-for-self-driving-vehicles

Stange, V., Vollrath, M. (2020): Hochautomatisiertes Fahren und Mischverkehr - Reaktion menschlicher Fahrer auf hochautomatisierte Fahrzeuge im Mischverkehr auf der Autobahn, Forschungsbericht Nr. 71 im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer, ISBN. 978-3-948917-01-2

Vogel (2003). A comparison of headway and time to collision as safety indicators. Accident Analysis and Prevention, 35, 427-433. https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00022-2

Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T. & Vollrath, M. (2018). Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 55, 464-482. https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.03.019

Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T. & Vollrath, M. (2019). Asleep at the automated wheel—Sleepiness and fatigue during highly automated driving. Accident Analysis and Prevention, 126, 70-84. https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.013

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

Wachenfeld, W., Winner, H., Gerdes, C., Lenz, B., Maurer, M., Beiker, S. A., Fraedrich, E., & Winkle, T. (2015) Use-Cases des autonomen Fahrens. In M. Maurer, J. Gerdes, B. Lenz, & H. Winner (Eds.), Autonomes Fahren (pp.9–37). Springer Vieweg.







Wilhelmstraße 43 / 43G 10117 Berlin

Tel.: 030 / 20 20 - 58 21

Fax: 030 / 20 20 - 66 33

unfallforschung@gdv.de www.udv.de www.gdv.de

• facebook.com/unfallforschung

Twitter: @unfallforschung

www.youtube.com/unfallforschung