Operator Monitoring zur Absicherung von Teleoperation und automatisiertem Fahren: Ergebnisse aus dem DFG-Schwerpunktprogramm *CoInCar* sowie einer Disseration

Nicolas Herzberger[1], Marcel Usai[2] und Frank Flemisch[3]

Zusammenfassung: Trotz bedeutender technischer Fortschritte im Kontext des automatisierten Fahrens sind aktuelle Systeme noch weit davon entfernt, jede auftretende Situation selbstständig lösen zu können. Neben dem Lösungsweg des minimalrisikoreichen Manövers (MRM) stehen insbesondere Transitionen der Fahraufgabe an die Fahrperson (Takeover Request, TOR) oder an einen Teleoperator im Fokus aktueller Forschungsvorhaben. In beiden Fällen ist es jedoch notwendig einzuschätzen, ob der jeweilige Operator, im Fahrzeug oder einer entfernten Leitwarte, die Fahraufgabe sicher übernehmen kann. Der Beitrag konzentriert sich nach einer kurzen Einführung auf aktuelle Studienergebnisse aus dem grade abgeschlossenen DFG-Schwerpunktprogramm 1835 *CoInCar* und aus einer Dissertation zum Operator Monitoring, sowie auf deren Bedeutung für die Absicherung von Transitionen im Kontext des automatisierten Fahrens sowie der Teleoperation.

Schlüsselwörter: Operator Monitoring, automatisiertes Fahren, Teleoperation, Teledriving, Teleassistenz, kooperative Automation, Hochautomation

1 Einleitung

Seit dem ersten automatisierten Prototyp VaMoRs (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen), der 1992 in Deutschland mit beinahe 100 km/h auf einem gesperrten Autobahnabschnitt fuhr (Projekt PROMETHEUS [1]), über den vollständig selbstfahrenden VW Touareg *Stanley* der 2005 die DARPA Grand Challenge gewann [2] hin zu der ersten Zulassung eines SAE Level 3 Systems (Mercedes DRIVE PILOT [3]) Ende 2021, haben sich die technischen Möglichkeiten in den vergangenen Jahren stetig entwickelt. Parallel dazu haben aus der begleitenden Forschung viele bedeutende Grundlagen wie die Kooperation zwischen Mensch und Maschine [4], [5], [6], die

[1] Nicolas Herzberger ist Gruppenleiter am IAW der RWTH Aachen University sowie am Fraunhofer FKIE, Fraunhoferstr. 20, 53343 Wachtberg (e-mail: nicolas.herzberger@fkie.fraunhofer.de)

[2] Marcel Usai ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der RWTH Aachen University sowie am Fraunhofer FKIE, Fraunhoferstr. 20, 53343 Wachtberg (e-mail: marcel.usai@fkie.fraunhofer.de)

[3] Frank Flemisch ist Professor am IAW der RWTH Aachen University sowie Abteilungsleiter am Fraunhofer FKIE, Fraunhoferstr. 20, 53343 Wachtberg (e-mail: frank.flemisch@fkie.fraunhofer.de)

kooperative Steuerung [7], [8] oder aber auch die zugehörige Taxonomie, über die Vorstöße der BASt Arbeitsgruppe [9] hin zu den SAE Levels of Automation [10] einen relevanten Beitrag zur sicheren Gestaltung und stetigen Weiterentwicklung dieser Systeme beigetragen. Und auch die Akzeptanz in der Bevölkerung ist inzwischen so weit angestiegen, dass ein Großteil angibt, sogar autonomen Fahrzeugen gegenüber aufgeschlossen zu sein [11]. Um diesen Akzeptanz- und Vertrauensvorschuss jedoch nicht zu verlieren, ist es notwendig, die noch offenen Herausforderungen zu identifizieren und gezielt zu adressieren.
So sind aktuelle Systeme bislang nicht in der Lage, alle Situationen selbstständig lösen zu können und werden dies aller Voraussicht nach auch in naher Zukunft nicht können. Als Beispiel für eine „unlösbare“ Situation soll hier ein unzulässig in zweiter Reihe geparkter Transporter dienen, bei gleichzeitig durchgezogenen Fahrstreifenmittellinie. Das Überholen über die Gegenfahrbahn wäre einem automatisierten System in dieser Situation entsprechend der Straßenverkehrsordnung nicht gestattet und es würde auf unbestimmte Zeit hinter dem Lieferwagen warten. Hier müsste der Passagier dann wieder zur Fahrperson werden, die Fahraufgabe übernehmen, das Hindernis umfahren und die Fahraufgabe wieder an die Automation abgeben. Alternativ, besonders auch im Kontext des ÖPNV wie z.B. bei Shuttles/Taxen etc. werden jedoch auch Transitionen der Fahraufgabe an einen Teleoperator erforscht. In beiden Fällen ist es jedoch aus sicherheitstechnischen Gründen absolut essentiell einschätzen zu können, ob die Fahrperson (lokal im Fahrzeug oder ein externer Teleoperator) in der Lage ist, eine sichere Übernahme leisten zu können.
An diesem Punkt kann das Konzept der Confidence Horizons [12], [13] dabei helfen, mögliche Defizite in der Kontrollverteilung der Fahraufgabe frühzeitig zu erkennen, um anschließend darauf reagieren zu können (siehe Abbildung 1).

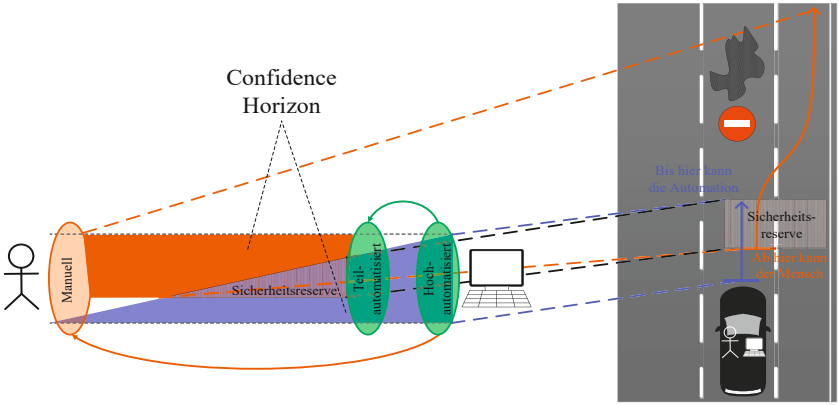

Abbildung 1: Confidence Horizon Konzept [12], [13].

Wie im linken Teil der Abbildung dargestellt, werden die Fähigkeiten der Fahrperson (orange) kontinuierlich mit denen des automatisierten Fahrsystems (blau) abgeglichen. Daraus ergibt sich entweder eine Überlappung, eine Sicherheitsreserve (wie rechts in der Abbildung dargestellt), oder ein Delta, d.h. ein kritisches Kontrolldefizit. Zur Einschätzung der Fähigkeiten der Fahrperson bzw. des Teleoperators werden im folgenden Kapitel aktuelle Studienergebnisse aus dem DFG SPP 1835 *CoInCar* sowie einer Dissertation [14] zum Operator Monitoring vorgestellt.

2 Operator Monitoring

Bereits vor der Einführung (teil-)automatisierter Fahrfunktionen wurden erste Systeme zur Unterstützung und Überwachung des Operators in Fahrzeugen eingesetzt. So starteten beispielsweise Müdigkeitserkenner zunächst rein zeitabhängig und entwickelten sich mit der Zeit über einfache Systeme, die ruckartiger werdendes Lenkverhalten detektierten, und Spurhalte-Erkennungssysteme, die Abweichungen von der Nulllinie registrierten, hin zu komplexen Systemen, die Veränderungen im Lenkverhalten zu individuellen Benchmarks mit kamerabasierten Informationen zum Außengeschehen und dem Blick der Fahrperson koppeln. Aber besonders mit zunehmender Automatisierung nahm die Forschung zum Thema Operator Monitoring deutlich zu: Von diversen physiologischen Parametern (EEG, EKG, EDA etc.) über Blickrichtungsmessung und Pupillometire hin zu kombinierten Maßen, wie z.B. Ansätzen zur Emotionsdetektion finden sich unterschiedlichste Konzepte und Prototypen in der Entwicklung oder bereits im Markt. Eine fundierte Einschätzung dieser Ansätze ermöglicht beispielsweise die Metastudie [15], welche auf Blickrichtungsmessungen basierende Systeme für die Technologie mit dem größten Potential hält.
Darauf aufbauend wurde im Rahmen der Dissertation [14] zunächst ein erster Schätzer entwickelt, welcher Blicke auf die Verkehrssituation zu Grunde legte. Dieser Ausgangspunkt wurde gewählt, da der Blick auf die Straße zumindest ein notwendiges Kriterium für den Aufbau des Situationsbewusstseins darstellt, wenngleich dies kein hinreichendes Kriterium darstellen muss (*looking but not seeing*).
Ausgehend von dem Ziel, diesen grundlegenden Involvierungsschätzer um zusätzliche Kriterien zu erweitern, zeigte sich, dass es bislang keine, zumindest keine öffentlich zugänglichen Ergebnisse gibt, welche Kriterien erfasst werden müssen, um eine (fehlende) Übernahmefähigkeit valide zu erfassen.

Um diese Kriterien zu identifizieren, wurde zwei Studien (statischer Fahrsimulator $N = 40$ [15] und Realverkehr $N = 20$ [16]) durchgeführt, die einen alternativen Ansatz zur Beurteilung der Involvierung von Fahrpersonen verfolgten. Dieser Ansatz beruhte auf der Annahme, dass Menschen auf dem Beifahrersitz in der Lage sind den Zustand und die aktuelle Aufmerksamkeit von Fahrpersonen zuverlässig einschätzen zu können – vergleichbar Fahrlehrenden, die die Aufmerksamkeit und Fähigkeiten ihrer Fahrlernenden einschätzen und basierend darauf entscheiden, ob und wann es nötig ist in die Fahraufgabe einzugreifen bzw. wann die Verkehrssituation von diesen selbstständig beherrscht werden kann [16].

Zur Identifikation der Bewertungskriterien wurden im Rahmen der Studien Fahrpersonen vor einer Übernahmeaufforderung aus zwei Perspektiven (1. Sicht auf die Umgebungssituation und 2. die Fahrperson) gefilmt, siehe Abbildung 2. Diese Videoaufzeichnungen wurden anschließend Teilnehmenden in einer Onlinebefragung (statischer Fahrsimulator $N = 80$ [15] und Realverkehr $N = 233$[16]) präsentiert zusammen mit den Fragen, ob die Fahrperson im Video die Fahraufgabe sicher übernehmen könnte und woran diese Entscheidung festgemacht wurde. Diese Einschätzungen wurden anschließend mit den tatsächlichen Übernahmeleistungen abgeglichen.

Abbildung 2: Zusammengefügte synchronisierte Videoausschnitte aus zwei Perspektiven [15].
Links: Fahrzeuginnenraum und Situation vor dem Fahrzeug. Rechts. Frontansicht der Fahrperson.

Es zeigte sich, dass die Teilnehmenden an den Onlinestudien keine valide Bewertung und somit keinen nutzbaren Kriterienpool liefern konnten. Dies lag vor allem daran, dass die Einschätzungen besonders auf dem Kriterium *Blick auf die Straße* beruhten. Besonders die Bewertung der Fahrpersonen im Fahrsimulator offenbarte hierbei aber eine besondere Herausforderung. So wurden den Fahrpersonen unterschiedliche fahrfremde Tätigkeiten angeboten, wie ein Tetris-Spiel oder ein Skype-Telefonat, in dem Quizfragen beantwortet werden sollten, um ein anstrengendes Telefonat zu simulieren.
Grade die zweite Aufgabe, das Telefonat, führte jedoch dazu, dass die Teilnehmenden zwar auf die Straße blickten, aber so stark abgelenkt waren, dass keine sichere Übernahme durchgeführt werden konnte (siehe Abbildung 2, rechts).

Da der gewählte Ansatz, die Beobachtung durch Beifahrende, nicht die gewünschten Bewertungskriterien lieferte und auch kein alternativer veröffentlichter Kriterienkatalog zur Verfügung stand, wurde mit dem vorrangigen Ziel der Erfassung der (fehlenden) Übernahmefähigkeit, daraufhin die Methode des Diagnostischen Takeover Requests [17] entwickelt.
Dabei erfolgt die Erfassung fehlender Übernahmefähigkeit mittels Klassifikationen von Orientierungsreaktionen auf eine Übernahmeaufforderung (Takeover Request, TOR), welche zunächst bei einer Vielzahl an Fahrpersonen, zusammen mit der anschließenden Übernahmequalität aufgezeichnet und ausgewertet werden. Basierend auf diesem Datensatz lassen sich post-hoc sichere und somit gute, von risikoreicheren, schlechten Übernahmen unterscheiden. Nachdem diese Aufteilung erfolgt ist, können die zuvor

gezeigten Orientierungsreaktionen auf den TOR analysiert werden, mit dem Ziel, trennscharfe Orientierungsreaktionen vor sicheren und unsicheren Übernahmen zu identifizieren [18], [19].
Zur Überprüfung der Methode wurden zwei Fahrsimulatorstudien (Studie 1: $N = 50$, statischer Fahrsimulator des ika der RWTH Aachen University, Studie 2: $N = 38$, statischer Fahrsimulator des IAW der RWTH Aachen University, siehe Abbildung 3) durchgeführt.

Abbildung 3: Statischer Fahrsimulator am IAW der RWTH Aachen University.

In beiden Studien durchfuhren unterschiedliche Teilnehmende das identische Szenario, siehe Abbildung 1 rechts, in welchem sie nach einer automatisierten Fahrt (15 min, 50% der Teilnehmenden führten Tetis als fahrfremde Tätigkeit aus) einen TOR erhielten. Anschließend wurden die Blickabfolgen in die möglichen Areas of Interest (AOI) entsprechend der ISO 15007:2020 sowie die jeweilige Übernahmequalität ausgewertet. Dabei konnten mehrere trennscharfe Blickfolgen, auch über beide Stichproben hinweg, identifiziert werden. Die Methode des Diagnostischen Takeover Requests scheint damit ein erster vielversprechender Ansatz zur Erfassung kritischer fehlender Übernahmefähigkeit zu sein.

3 Implikationen für Transitionen an die Fahrperson oder einen Teleoperator

Die Ergebnisse der Studien skizzieren mit dem Diagnostischen Takeover Request einen vielversprechenden Ansatz für die Absicherung der Transitionen an die Fahrperson oder einen Teleoperator. Hinsichtlich der Transitionen und der zugehörigen Absicherungsanforderungen müssen diese jedoch differenziert betrachtet werden:

So werden Transitionen im Normalbetrieb und an unkritischen Systemgrenzen, wie z.B. eine bevorstehende Autobahnausfahrt, wenn die Operation Desing Domain (ODD) nur die Autobahn beinhaltet, sehr viel weniger zeit- und sicherheitskritisch sein als Systemausfälle oder plötzlich auftretende Systemgrenzen. Und auch für die Teleoperation müssen, die Anforderungen an Operator Monitoring Systeme betreffend, unterschiedlich kritische Anwendungsfälle unterschieden werden: So werden im Bereich des niederautomatisierten Teledrivings, in welchem die Fahrzeuge dauerhaft aus der Ferne gesteuert werden, kaum bis gar keine Transitionen stattfinden. Hier besteht die Sinnhaftigkeit für Operator Monitoring Systeme eher im Bereich der Müdigkeits-/ Aufmerksamkeitsüberwachung und der Lenk- bzw. Arbeitszeiten. Deutlich (zeit-) kritischer hingegen ist der Bereich des teil- und hochautomatisierten Teledrivings, sowie der Teleassistenz, in welcher ein Teleoperator nur „on demand“ hinzugeschaltet wird. Dieser kann dann entweder das Fahrzeug direkt steuern, was hohe Anforderungen an beispielsweise Latenzen mit sich bringt, oder ausschließlich manöverbasiert intergieren, indem einzelne Fahrmanöver, z.B. ein Überholvorgang lediglich freigegeben werden, die eigentliche Steuerung aber weiterhin lokal von der Faurzeugautomation übernommen wird [20]. Die Transitionen zu einem Teleassistant sind daher eher mit denen an eine lokale Fahrperson vergleichbar. Dennoch eröffnet das Operator-Monitoring im Bereich der Teleoperation eine Vielzahl neuer Fragestellungen, wie z.B. In welchem Kontext und in welchem Umfang muss, auch aus zulassungsrechtlichen Gründen, eine Überwachung des Teleoperators erfolgen? Was müssen diese Systeme erfassen? Ist ein verringertes Situationsbewusstsein des Teleoperators z.B. auf Grund der räumlichen Entkopplung zu erwarten? Geht dies mit Reaktionsverzögerungen einher? Lassen sich bisherige Operator-Monitoring Konzepte und Methoden übertragen?

Grade die Übertragbarkeit bestehender Ansätze erscheint jedoch fraglich. So lassen sich z.B. die bestehenden lenkungsbasierten Müdigkeitserfassungssysteme kaum einsetzen, da durch Latenzschwankungen von einer hohen Varianz im Lenkverhalten auszugehen ist. Und auch die Orientierungsmuster, wie sie z.B. während des Diagnostischen TORs analysiert werden, lassen sich nicht ohne weiteres übertragen, da sich die (zusätzlichen) Ansichten des Teleoperators auch in der Anordnung von denen der Fahrperson im Fahrzeug unterscheiden.

Die offenen Fragestellungen sollten jedoch in naher Zukunft adressiert werden, da bereits heute erste Fahrzeuge mit Ausnahmegenehmigungen im Straßenverkehr unterwegs sind und erste Unfälle, die durch ein effektives Operator Monitoring hätten vermieden werden können, leicht das Vertrauen in die Teleoperation als zukünftigen Use-Case und als Geschäftsmodell verspielen könnten.

4 Fazit und Ausblick

Ausgangspunkt für den vorliegenden Beitrag waren große technische Fortschritte des automatisierten Fahrens sowie im Bereich der Teleoperation, die gleichzeitig wieder neue Herausforderungen für die sichere Mensch-Maschine-Kooperation und -Interaktion bedeuten. Die Ergebnisse aus den Studien zeigen, dass auch bei geringen Übernahmezeiten erste Abschätzungen zur Absicherung der Transition getroffen werden

können. Jedoch gilt es dabei zu berücksichtigen, dass nur eine Situation im Detail getestet wurde und auf die einzelnen Orientierungsmuster auf Grund der hohen Anzahl an möglichen Kombinationen nur geringe Fallzahlen der Stichprobe entfallen. Dennoch bietet die Methode des Diagnostischen Takeover Requests in Verbindung mit den Confidence Horizons gute Möglichkeiten, die Orientierungsmuster weiter zu verdichten: So beschäftigt sich eine anschließende Dissertation aktuell mit der Ergänzung um weitere Bestandteile der Orientierung, wie dem Kontakt zu Stellteilen, oder der Verlagerung der Körperhaltung. Erste Ergebnisse deuten auch hier auf trennscharfe Muster hin, die zur weiteren Absicherung der Transitionen genutzt werden können. Inwiefern sich diese Orientierungsmuster auch auf Übergaben an einen Teleoperator übertragen lassen, müssen zukünftige Studien adressieren. Die Teleoperation gerade in Verbindung mit Automation ist aktuell ein Themenfeld mit einer hohen Dynamik, was begleitende absichernde Forschungsvorhaben gerade auch zu Transitionen unabdingbar macht.

Literatur

[1] Lossau, N. (2017). Das erste autonome Auto kostete 200.000 D-Mark. Welt. https://www.welt.de/wissenschaft/article169604489/Das-erste-autonome-Auto-kostete-200-000-D-Mark.html

[2] Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.-E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., van Niekerk, J., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A. & Mahoney, P. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics, 23(9), 661–692.

[3] Hubik, F. (9. Dezember 2021). Daimler erhält Level-3-Freigabe: S-Klasse fährt teils autonom. Handelsblatt. https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autonomes-fahren-daimler-erhaelt-level-3-freigabe-s-klasse-darf-autonom-auf-autobahnen-fahren/27877760.html?ticket=ST-8718105-AbBgv3bH0eO9SspLduDG-cas01.example.org

[4] Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T. & Schutte, P. (2003). The H-Metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction.

[5] Hoc, J.-M. & Pacaux-Lemoine, M.-P. (1998). Cognitive Evaluation of Human-Human and Human-Machine Cooperation Modes in Air Traffic Control. The International Journal of Aviation Psychology, 8(1), 1–32.

[6] Pacaux-Lemoine, M.-P. & Flemisch, F. O. (2016). Layers of Shared and Cooperative Control, assistance and automation. IFAC-PapersOnLine, 49(19), 159–164.

[7] Flemisch, F. O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H. & Bruder, R. (2014). Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. Ergonomics, 57(3), 343–360.

[8] Schneemann, F. & Diederichs, F. (2019). Action prediction with the Jordan model of human intention: a contribution to cooperative control. Cognition, Technology & Work, 21(4), 711–721

[9] Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., … & Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe ; [Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.5409013.01. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen F, Fahrzeugtechnik: Bd. 83. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft.

[10] SAE International (2021). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (No. J3016_202104). 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. SAE International.

[11] Herzberger, N. D., Schwalm, M., Reske, M., Woopen, T., & Eckstein, L. (2019). *Mobilitätskonzepte der Zukunft-Ergebnisse einer Befragung von 619 Personen in Deutschland im Rahmen des Projekts UNICARagil*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.

[12] Flemisch F., Schwalm, M. (2019). Systemergonomie für kooperativ interagierende Automobile: Nachvollziehbarkeit des Automationsverhaltens im Normalbetreib, an Systemgrenzen und bei Systemausfall. DFG Folgeantrag.

[13] Herzberger, N., Usai, M. & Flemisch, F. (2022). Confidence Horizon for a Dynamic Balance between Drivers and Vehicle Automation: First Sketch and Application. In AHFE International, Human Factors in Transportation. AHFE International.

[14] Herzberger, N.D. (2023). Erfassung der Übernahmefähigkeit von Fahrpersonen im Kontext des automatisierten Fahrens. Dissertation. Shaker Verlag.
[15] Herzberger, N. D., Schwalm, M., Flemisch, F. O., Schmidt, E. & Sitter, A. (2019). Erfassung der Fahrerübernahmefähigkeit im automatisierten Fahren anhand von Fahrerbeobachtungen. In *Mensch-Maschine-Mobilität 2019* (S. 53–66). VDI Verlag. https://doi.org/10.51202/9783181023600-53
[16] Meyer, M.-L. (2017). *Fahrerzustand - Der Beifahrer als Maßstab*. Unveröffentlichte Masterarbeit. RWTH Aachen University.
[17] Schories, L., Erggelet, M., Schwalm, M. & Herzberger, N. D. (2018). *Verfahren zum Feststellen einer Übernahmefähigkeit eines Fahrzeugnutzer eines Fahrzeugs* (DE 10 2018 007 508 A8). Deutschland.
[18] Herzberger, N. D., Eckstein, L. & Schwalm, M. (2018). Detection of Missing Takeover Capability by the Orientation Reaction to a Takeover Request. In Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR (Hrsg.), 27. Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (S. 1231–1240).
[19] Schwalm, M., & Herzberger, N. D. (2018). Die Erfassung des Fahrerzustands als Voraussetzung für höher automatisierte Fahrfunktionen–Eine kritische Diskussion und ein Lösungsvorschlag. In 12. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting (Albmühltal) (Vol. 26, No. 28.09, p. 2018)
[20] Herzberger, N., Wasser, J., Flemisch, F. (2022). Control Centers for Maneuver-based Teleoperation of Highly Automated and Autonomous Vehicles: System Model and Requirements. In: Katie Plant and Gesa Praetorius (eds) Human Factors in Transportation. AHFE (2022) International Conference. AHFE Open Access, vol 60. AHFE International, USA.