

Modellierung der Ausprägung und Auswirkungen mentaler Belastungszustände von Fernassistenten für hochautomatisierte Fahrzeuge

Fabian WALOCHA, Andreas SCHRANK, Hoai Phuong NGUYEN, Klas IHME

*Institut für Verkehrssystemtechnik,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig*

Kurzfassung: Wechselnde mentale Belastung bei Mitarbeitenden der technischen Aufsicht für automatisierte Fahrzeuge kann zu Performanzeinbußen führen. Eine Erfassung der Arbeitslast während der Aufgabebearbeitung auf Basis physiologischer Methoden kann helfen, Phasen von Überlast und Unterlast zu erkennen und kritischen Situationen entgegenzuwirken. Zur Untersuchung mentaler Last in der Leitstelle führten wir eine Simulatorstudie durch, in der die Teilnehmenden (insgesamt 41, 35 männlich, 6 weiblich, Durchschnittsalter: 25,1 Jahre) die Aufgabe einer Fernassistenten („Remote Assistance“) erfüllen mussten. Währenddessen wurden verschiedene Stufen mentaler Arbeitsbelastung (niedrig vs. hoch) durch eine auditive *n-back* Sekundäraufgabe induziert. Während des Experiments wurden physiologische und leistungsbezogene Indikatoren der mentalen Arbeitsbelastung erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass eine hohe Arbeitsbelastung die Leistung der Assistenten tatsächlich beeinträchtigt. Darüber hinaus konnten wir signifikante physiologische Effekte in Bezug auf die Hautleitfähigkeit, die Herzfrequenz und die Pupillengröße zwischen den Arbeitsbelastungsbedingungen feststellen. Mithilfe eines Gradient-Boosting-Modells und einer wiederholten Kreuzvalidierung (leave-one-subject-out) konnten wir den Grad der Arbeitsbelastung mit einer durchschnittlichen *Area-under-the-curve* von 0,67 über alle Teilnehmer klassifizieren. Zusammengefasst tragen diese Ergebnisse dazu bei, die Auswirkungen mentaler Arbeitsbelastung auf die Leistung von Fernassistenten zu verstehen und ebnen den Weg zur Entwicklung von Methoden zur Echtzeiterfassung von Arbeitsbelastung als Grundlage für adaptive Unterstützungssysteme.

Schlüsselwörter: mentale Arbeitsbelastung, Teleoperation, hochautomatisierter Verkehr

1. Einleitung

Der Gedanke an hochautomatisierte Fahrzeuge (engl. *highly automated vehicles*, HAVs) rückt immer mehr ins öffentliche Bewusstsein und ihr alltäglicher Einsatz auf öffentlichen Straßen wird immer mehr zur Realität. Allerdings sind die Bedingungen, unter denen HAVs in der Lage sind selbstständig zu fahren, noch nicht abschließend technisch ermöglicht. Wenn HAVs in Situationen geraten, die außerhalb dieses Rahmens liegen, muss die Kontrolle über das Fahrzeug vorübergehend anderweitig ausgeübt werden, um diese Grenzen zu überbrücken, zum Beispiel durch eine Technische

Aufsicht. Die Aufgabe eines solchen Fernassistenten als Technische Aufsicht soll darin bestehen, Entscheidungen zu treffen und HAVs wieder in einen sicheren Betriebszustand zu führen (SAE International 2018). Ähnlich wie bei anderen Leitstellenberufen erwarten wir, dass HAV-Fernassistenten wachsam bleiben und die Fähigkeit haben müssen, bei Problemen mit den HAVs ausreichend aufmerksam zu sein (Migliorini et al. 2022). Frühere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Aufmerksamkeit stark nachlässt, wenn die Assistenten einer hohen Arbeitsbelastung ausgesetzt sind. Daher könnte das Wissen darüber, wann solche Phasen hoher Arbeitsbelastung während der Erledigung von Aufgaben auftreten, die Entwicklung adaptiver Unterstützungssysteme ermöglichen, die eine Beeinträchtigung der Aufmerksamkeit verhindern.

Folglich ist das Ziel der Studie die Entwicklung von Methoden zur Bewertung und Erfassung von Über- und Unterforderung von Fernassistenten in einer Simulationsumgebung auf Grundlage von neuroergonomischen Indikatoren wie Eyetracking und physiologischen Daten. Für diese Studie wählten wir eine kontrollierte Manipulation der mentalen Arbeitsbelastung auf der Basis der gut etablierten *n-back* Sekundäraufgabe.

2. Methoden

Als Simulator wurde ein eigenentwickelter prototypischer Teleoperationsarbeitsplatz verwendet (siehe Abbildung 1, Kettwich et al. 2021). Zusätzlich zur Standardausstattung war der Simulator mit weiterer Hardware zur Überwachung des Fernassistenten ausgestattet. Dazu gehörten ein kamerabasiertes Eyetracking-System (Smart-EyePro mit vier Kameras, Abtastrate 60 Hz) und ein tragbares System (movisens Ecg-Move 4 & movisens EdaMove 4) zur Messung der elektrodermalen Aktivität (Elektroden an den proximalen Phalangen des Zeige- und Mittelfingers der linken Hand, Abtastrate 32 Hz) und des Elektrokardiogramms (Abtastrate 1024 Hz). Die Probanden mussten innerhalb eines Studiendesigns mit Messwiederholung jeweils eine von drei typischen Fernassistentenaufgaben bearbeiten (nach einer vorangestellten Trainingsphase und Baselineerhebung). Währenddessen wurde eine auditive *n-back* Sekundäraufgabe mit Schwierigkeit $n=1$ oder $n=2$ abgespielt, um gleichzeitig die mentale Arbeitsbelastung der Probanden zu manipulieren (für Studiendetails siehe Schrank et al. 2023).



Abbildung 1: Studienaufbau bestehend aus einem prototypischen Arbeitsplatz zur Fernassistenz, einem Tablet-Computer zur Präsentation der *n-back*-Aufgaben sowie Sensorik zur Erfassung von Blickverhalten, Pupillenverhalten, Hautleitfähigkeit, Herzrate und Herzratenvariabilität

Insgesamt nahmen 41 Probanden (zwischen 18 und 35 Jahren, mittleres Alter: 26 Jahre, 35 Männer, 6 Frauen) an der Studie teil. Die Teilnehmer wurden im Vorfeld so ausgewählt, dass sie die Anforderungen für die Technische Aufsicht gemäß der deutschen Gesetzgebung (§ 1e StVG, 2021 & rev. 2021) erfüllten. So verfügten alle Teilnehmer über ein normales oder korrigiertes Sehvermögen, einen kürzlich abgeschlossenen Hochschulabschluss (oder einen gleichwertigen Abschluss) in einem der gesetzlich für die Technische Aufsicht zugelassenen ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge und regelmäßige Fahrerfahrung sowie einen gültigen Führerschein. Achtundzwanzig von ihnen hatten nach eigenen Angaben bereits Erfahrung mit der Überwachung technischer Systeme.

3. Ergebnisse

Eine Manipulationskontrolle mittels NASA-TLX (Hart & Staveland 1988) ergab einen Anstieg der erlebten mentalen Arbeitsbelastung von der Baseline zu den leichten ($n=1$) und den schweren ($n=2$) n-back Bedingungen (ohne Sekundäraufgabe: $m = 6,7$, $SD = 2,6$; leicht: $m = 8,7$, $SD = 2,3$; schwer: $m = 10,4$, $SD = 2,3$). Des Weiteren lassen sich signifikante Unterschiede bei unterschiedlicher n-back Bedingung sowohl in der Performanz der Hauptaufgabe (operationalisiert als Aufgabenbearbeitungszeit) erkennen (40.46 ± 12.4 zu 47.06 ± 18.3 Sekunden, $t = -3.19$, $p < .01$), sowie in der Performanz der Nebenaufgabe (operationalisiert als korrekte Antworten aus 30, 29.73 ± 0.6 zu 28.43 ± 1.9 , $t = 8.18$, $p < .001$).

Die Eyetracking- und physiologischen Indikatoren wurden jeweils durch ein z-scoring über alle aufgenommenen Daten pro Probanden vorverarbeitet. Die Unterschiede in den korrigierten Indikatoren der mentalen Arbeitsbelastung zwischen den Bedingungen leicht und schwer sind in Abbildung 2 dargestellt. Es gab signifikante Unterschiede zwischen der leichten ($n=1$) und der schweren ($n=2$) Belastungsbedingung in Bezug auf den Pupillendurchmesser ($U = 9850$, $p < .001$), den Hautleitwert ($U = 11080$, $p < .05$), das Interbeat-Intervall ($U = 15616$, $p < .001$) und die Herzratenvariabilität ($U = 15367.5$, $p < .01$). Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen wurden bei der Augenlidöffnung, der Fixationsdauer und der Fixationsstreuung festgestellt.

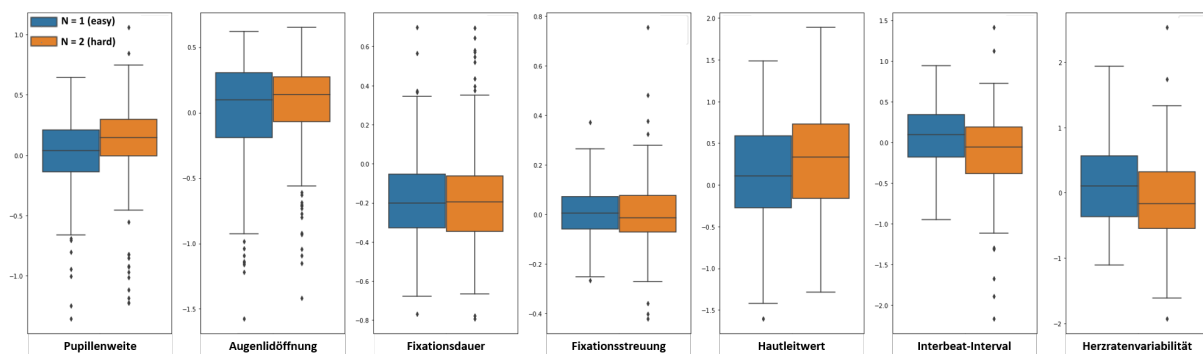


Abbildung 2: Vergleich der leichten ($n=1$) und schweren ($n=2$) Arbeitslastbedingung anhand Pupillen- und blickbezogenen Indikatoren (Pupillendurchmesser, Augenlidöffnung, Fixationsdauer, Fixationsstreuung) sowie physiologische Indikatoren (Hautleitwert, Interbeat-Intervall, Herzratenvariabilität)

Die multivariate Klassifizierung von Eyetracking- und physiologischen Daten zur Unterscheidung zwischen geringer ($n=1$) und hoher ($n=2$) Arbeitsbelastung wurde mit Gradient-Boosting-Bäumen (XGBoost, Chen et al. 2015) durchgeführt. Hier bestätigt eine nested Gridsearch, dass Modelle mit beschränkter Komplexität bei ungesehenen Daten die besten Ergebnisse erzielen ($\gamma=1$, niedrige maximale Tiefe: $\text{max_depth}=3$, hohes Instanzgewicht zu Partitionierung: $\text{min_child_weight}=5$). Beim Training mit wiederholter Kreuzvalidierung (leave-one-subject-out) mit dem vollen Feature-Set (Eyetracking und Physiologie) konnte eine durchschnittliche Klassifikationsleistung von einer Area-under-the-curve der *Receiver-Operating-Characteristic* (AUC) von .67 erreicht werden (siehe Abbildung 3, links). Abbildung 3 visualisiert die zeitaufgelöste Klassifikationsleistung für einen Beispielprobanden und zeigt, dass hohe Arbeitsbelastung vor allem zu Beginn der Arbeitsbelastungsinduktionsblöcke erkannt wird. Die visuelle Inspektion zeigt, dass diese Perioden der detektierten hohen Arbeitsbelastung bei der leichten Aufgabe ($n=1$) kürzer sind als bei der schweren Aufgabe ($n=2$).

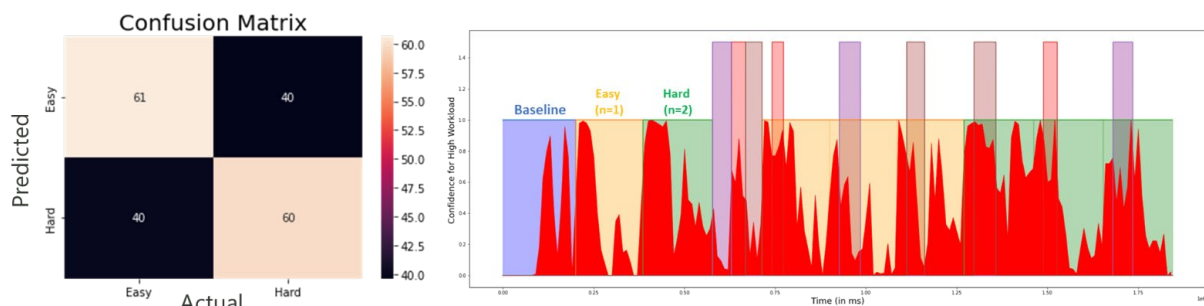


Abbildung 3: (Links) Konfusionsmatrix für multimodale Klassifizierung auf Basis des gesamten Merkmalsatzes (Eyetracking + Physiologie) mit Anzeige der tatsächlichen und vorhergesagten Arbeitsbelastung. (Rechts) Visualisierung der zeitaufgelösten Arbeitsbelastungsklassifikation (Konfidenz für hohe Arbeitsbelastung auf der y-Achse) für einen beispielhaften Probanden (Sliding-Window-Klassifikation auf überlappenden 10s-Fenstern)

4. Diskussion

Die Kernaussage der Studie ist, dass eine multimodale Zustandserfassung für die Bewertung der Arbeitsbelastung des Fernassistenten in einer Teleoperationsleitstelle in einem Echtzeitkontext möglich ist. Es lassen sich signifikante intrapersonelle Unterschiede in den z-score-korrigierten neuroergonomischen Indikatoren erkennen zwischen den n-back-Stufen bei Pupillendurchmesser, Hautleitwert, Interbeat-Intervall und Herzfrequenzvariabilität festgestellt. Es gibt verschiedene potenzielle Verbesserungsmöglichkeiten für eine solche Zustandserfassung. Einerseits könnte man mithilfe eines personalisierten Modellierungsschemas besser die idiosynkratischen Ausdrücke von mentaler Arbeitsbelastung herausstellen. Außerdem könnte man durch Hinzuziehen von Sensoren, welche über Peripherphysiologie hinausgehen, eine Verbesserung der Qualifikationsgüte erreichen. Hier eignen sich insbesondere neurophysiologische Verfahren, die spezifischer für die Erfassung mentaler Arbeitsbelastung

sind (Unni et al. 2017). Hierbei gilt es aber immer den Kontext der Aufgabe des Fernassistenten im Blick zu behalten. Denn die Erfassung neurophysiologischer Verfahren, wie Elektronenzephalographie oder funktionale Nahinfrarotspektroskopie, gehen oft mit aufwändigeren Erfassungsaufbauten und längeren Vorbereitungszeiten einher, die potenziell aufgabeninvasiv für die Operateure sind. Allerdings ist die Entwicklung im Bereich der Sensortechnik zurzeit stark auf bequemere Systeme mit kabelloser Datenübertragung ausgerichtet, sodass die Aufgabeninvasivität in Zukunft eine geringere Rolle spielen könnte (Wascher et al. 2023). Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse dieser Studie das Potenzial neuroergonomischer Methoden zur Erfassung mentaler Arbeitsbelastung im Kontext der technischen Aufsicht für HAVs mit dem Ziel der Prävention belastungsbedingter Performanzeinbußen.

5. Literatur

- Chen T, He T, Benesty M, Khotilovich V, Tang Y, Cho H, Chen K, Mitchell R, Cano I, Zhou T & others (2015). Xgboost: extreme gradient boosting. R package version 0.4-2, 1(4), 1–4.
- Hart SG & Staveland LE. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (Bd. 52, S. 139–183). Elsevier.
- Kettwich C, Schrank A & Oehl M (2021). Teleoperation of highly automated vehicles in public transport: User-centered design of a human-machine interface for remote-operation and its expert usability evaluation. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(5), 26.
- Migliorini Y, Imbert J-P, Roy RN, Lafont A & Dehais F (2022). Degraded states of engagement in air traffic control. *Safety*, 8(1), 19.
- SAE International (2018). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. SAE International.
- Schrank A, Walocha F, Brandenburg S & Oehl M (2023). Human-Centered Design and Evaluation of a Workplace for the Remote Assistance of Highly Automated Vehicles. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.02330>
- Straßenverkehrsgesetz: Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion; Widerspruch und Anfechtungsklage (2021 & rev. 2021). <https://dejure.org/gesetze/StVG/1e.html>
- Unni A, Ihme K, Jipp M & Rieger JW (2017). Assessing the Driver's Current Level of Working Memory Load with High Density Functional Near-infrared Spectroscopy: A Realistic Driving Simulator Study. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 167. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00167>
- Wascher E, Reiser J, Rinkenauer G, Larrá M, Dreger FA, Schneider D, Karthaus M, Getzmann S, Gutberlet M & Arnau S (2023). Neuroergonomics on the go: An evaluation of the potential of mobile EEG for workplace assessment and design. *Human Factors*, 65(1), 86–106.

Danksagung:

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizont 2020 der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 101006664 gefördert. Die Autoren möchten allen Partnern von Hi-Drive für ihre Zusammenarbeit und ihren wertvollen Beitrag danken.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de