

Deutsche Gesellschaft für Luftfahrtpsychologie e.V. (DGLP)

Tagung vom 6. bis 8. November 2023, Bückeburg

Führt das Tragen von Sauerstoffmasken zu Leistungseinbußen bei Piloten?

Julia Maier, Frank Albers, Kevin Schudlik

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Luft- und Raumfahrtpsychologie Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Hamburg

Zusammenfassung

Das Tragen von Sauerstoffmasken ist für Piloten unter definierten Umständen unerlässlich. Unklar ist bisher, inwiefern die Benutzung dieser persönlichen Schutzausrüstung die kognitive Leistung von Piloten beeinträchtigt. Die Befundlage hierzu ist uneindeutig, legt aber nahe, dass das Tragen von Masken an sich eher keine negativen Effekte für kognitive Leistungen hat.

In der vorliegenden Studie wurde die kognitive Leistung von insgesamt 18 Piloten mit und ohne Sauerstoffmaske für zwei verschiedene Maskenmodelle in einem Simulator erfasst. Im Rahmen eines simulierten Fluges (Druckverhältnisse sowie Atemluftzusammensetzung entsprachen den Bedingungen am Boden) wurden zwei klassische visuelle Wahrnehmungsaufgaben sowie eine akustische Gedächtnisaufgabe eingesetzt, um die Leistung der Piloten in einem experimentellen Design zu erfassen.

Im Vergleich zur Baseline ohne Maske blieb die Leistung in den visuellen Aufgaben mit Maske für beide Maskentypen relativ konstant, wenn die Anzahl korrekter Antworten als abhängige Variable herangezogen wurde. Wurde allerdings die Reaktionszeit als Leistungsmaß betrachtet, war diese im Vergleich zur Baseline signifikant verlängert, wenn eine Maske getragen wurde. In der akustischen Aufgabe zeigten sich Leistungseinbußen sowohl in der Anzahl der korrekt gelösten Aufgaben als auch in der Reaktionszeit. Es gab keine bedeutsamen Unterschiede zwischen den eingesetzten Masken.

Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass eine tiefergehende Analyse möglicher Leistungsparameter lohnenswert ist, um die Effekte des Tragens von Sauerstoffmasken auf kognitive Leistung zu ermitteln. Die aktuellen Ergebnisse weisen darauf hin, dass das Tragen von Sauerstoffmasken eine negative Auswirkung auf die kognitive Leistung von Piloten hat, insbesondere, wenn die Maske über längere Zeit und unter Mehrfacharbeitsbedingungen getragen wird.

Kontakt:

Dr. Julia Maier

Tel.: +49 40 513096-95

E-Mail: Julia.Maier@dlr.de

Adresse: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Luft- und Raumfahrtpsychologie, Sportallee 54a, 22335 Hamburg, Germany

Hintergrund und Forschungsziel

Das Tragen von Sauerstoffmasken ist für Piloten unerlässlich, wenn das zu führende Fluggerät eine bestimmte Flughöhe erreichen kann (European Aviation Safety Agency, 2023). Aus diesem Grund sind Sauerstoffsysteme ein integraler Aspekt der sicherheitsrelevanten Ausstattung für Piloten und Kabinencrew in allen kommerziellen Flugzeugen. Die Crew ist insbesondere in Notfallsituationen darauf angewiesen, dass die verfügbaren Sauerstoffmasken einfach zu handhaben und ergonomisch sind und dass die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der zu erfüllenden Aufgaben in solchen ohnehin fordernden Situationen nicht verringert wird. Vor allem die kognitive Leistungsfähigkeit muss erhalten bleiben, stellt sie doch eine der wichtigsten Anforderungen für den Pilotenberuf dar (Goeters, Maschke & Eißfeldt, 2004).

Verschiedene Forschungsarbeiten befassten sich bisher mit den Auswirkungen des Tragens von Sauerstoffmasken: Ein großer Teil der veröffentlichten Studien thematisierte allerdings nicht psychologische Fragestellungen, sondern ergonomische Aspekte (wie zum Beispiel die Arbeiten von Lee et al., 2018), oder die Effekte unterschiedlicher Sauerstoffmengen, die über die Masken zugeführt werden (z.B. Sausen et al., 2001, Peacock et al., 2017). Nur vereinzelt wurden dabei Sauerstoffsysteme für Piloten berücksichtigt.

In einer der wenigen Forschungsarbeiten zur kognitiven Leistungsfähigkeit zeigten Caretti et al. (1995), dass das Tragen von Sauerstoffmasken nicht zu Leistungseinbußen führte. Auch bei Zimmerman et al. (1991) zeigten sich keine signifikanten Auswirkungen auf kognitive Aufgaben, wohl aber auf eine psychomotorische Aufgabe. Andererseits berichtete Caretti in einer späteren Studie von negativen Effekten des Masketragens für einzelne Leistungsmaße, wobei diese aber visuellen Einschränkungen zugeschrieben wurden (Caretti, 1999). Und auch bei AlGhamri et al. (2013) fanden sich negative Effekte im Hinblick auf einzelne kognitive Leistungsindikatoren.

Insgesamt ist die aktuelle Befundlage somit wenig eindeutig, wenn auch die meisten Befunde nahelegen, dass das Tragen von Sauerstoffmasken an sich eher keine negativen Auswirkungen auf kognitive Leistungen hat. In der vorliegenden Studie wurde daher genauer analysiert, inwiefern und für welche Leistungsmaße das Tragen von Sauerstoffmasken für Piloten negative Effekte aufweist. Folgende Forschungsfragen wurden formuliert:

1. Hat das Tragen von Sauerstoffmasken einen direkten Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit von Piloten?
2. Lassen sich differenzielle Effekte für verschiedene Masken nachweisen?
3. Wie ist die Auswirkung auf unterschiedliche abhängige Variablen? (visuell vs. akustisch; hits vs. Reaktionszeit)

Die empirische Beantwortung dieser Fragen liefert sowohl theoretische als auch praktische Implikationen für Forschungs- und Anwendungsfelder der Ergonomie und Human Factors. Umgesetzt wurde die vorliegende Studie in Zusammenarbeit mit Safran Aerosystems S.A., Plaisir, Frankreich, gefördert durch Clean Sky 2 Joint Undertaking (JU) unter grant agreement No. 945583, CS2-LPA-

GAM-2020-2023-01. Eine bei Safran Aerosystems neuentwickelte Sauerstoffmaske wurde in diesem Zusammenhang durch das DLR e.V. umfassend evaluiert (s. Maier et al., 2023); gleichzeitig konnten Daten zur Leistungsfähigkeit von Piloten beim Tragen von Sauerstoffmasken erfasst werden.

Methode

Die Datenerhebung fand in zwei Versuchsträgern statt, die von Safran Aerosystems S.A. bereitgestellt worden waren. Beide Demonstratoren waren nachgebildete Cockpits, in denen je ein Sauerstoffsystem (konventionelle Maske/neue Maske, s.u.) und ein Human-Machine-Interface (HMI) zur Steuerung des „Flugzeugs“ und zur Absolvierung vorgegebener Flugaufgaben verfügbar waren (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Versuchsträger – links konventionelle Maske, rechts neue Maske © DLR

Bei der konventionellen Maske (legacy mask) handelte es sich um ein Modell, das in aktuellen Verkehrsflugzeugen Verwendung findet. Die Maske wurde rein mechanisch gesteuert, über analoge Schalter an der Maske. Die neue Maske (new mask) konnte mit dem HMI gesteuert werden und war zu diesem Zweck über ein Remote Data and Power Cabinet (RDPC) Gateway mit diesem verbunden. Über beide Masken wurde mit Hilfe eines Reglers konstant und gleichmäßig Umgebungsluft dargeboten.

Stichprobe

Die Stichprobe umfasste insgesamt 19 Piloten und 1 Pilotin im Alter von 21 bis 33 Jahren ($M = 26.8$ Jahre, $SD = 4.0$ Jahre), von denen 70% eine CPL, 30% eine ATPL innehatten. Größe und Gewicht variierten zwischen 168 cm–190 cm ($M = 178.5$ cm, $SD = 6.1$ cm) bzw. 60 kg–90 kg ($M = 72.8$ kg, $SD = 10$ kg). Alle Versuchspersonen waren französischer Nationalität. Nur drei von ihnen

hatten bisher keine Erfahrung mit dem Gebrauch von Sauerstoffmasken, alle anderen hatten Erfahrungen aus dem Simulator oder dem Cockpit. Für ihre Teilnahme wurde den Versuchspersonen eine Entschädigung von 200 € gezahlt.

Instrumente

Es wurden drei unterschiedliche Instrumente zur Erfassung der kognitiven Leistung eingesetzt. Für die Datenanalyse wurden von allen Instrumenten zwei Leistungsindikatoren ermittelt, nämlich zum einen der Anteil korrekter Reaktionen (Hits), zum anderen die Reaktionszeit in Millisekunden (ms).

Deary-Liewald Task (DLT)

Mit der Deary-Liewald Task (Deary et al., 2011) wurde eine klassische Aufgabe zur kognitiven Reaktionszeitmessung verwendet. Diese umfasst eine einfache Reaktionsaufgabe und eine Wahl-Reaktionsaufgabe. Für die vorliegende Studie wurden ausschließlich Ergebnisse der Wahl-Reaktions-Aufgabe verwendet, bei der die Probanden so schnell wie möglich mit einer von vier Tasten auf vorgegebene visuelle Reize reagieren müssen.

Visual Search Task (VST)

Zur weiteren Erfassung der visuellen Reaktionsgeschwindigkeit wurde die Visual Search Task eingesetzt (VST, Treisman, 1982). Hierbei müssen die Probanden einen Zielreiz zwischen ähnlichen Distraktoren identifizieren. Die Reaktion erfolgt durch Drücken einer Keyboard-Taste.

Acoustical Side Task (AST)

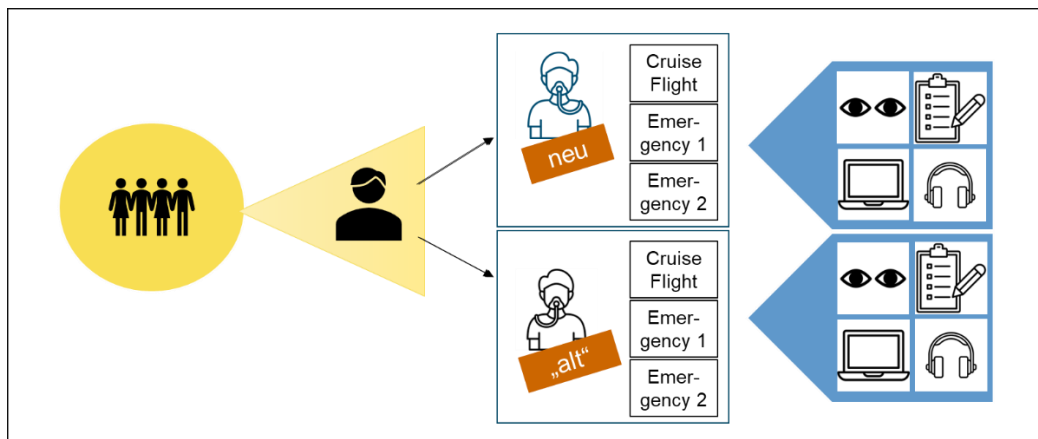
Die Acoustical Side Task (AST) in Anlehnung an Jaeggi et al. (2010) ist eine klassische Aufgabe zur Erfassung des akustischen Gedächtnisses in Form einer N-back Aufgabe: Dabei werden kontinuierlich Ziffern zwischen 1 und 9 akustisch dargeboten und die Probanden müssen per Tastendruck reagieren, sobald die aktuelle Ziffer derjenigen entspricht, die an einer definierten Position zuvor dargeboten wurde. Diese Nebenaufgabe musste von den Probanden parallel zu den zu bearbeitenden Flugaufgaben bearbeitet werden (Mehrfacharbeit). Im Anschluss an die Flugaufgaben wurde die AST bis zum Ende der Versuchsphase allein weiterbearbeitet (Einfacharbeit).

Testprotokoll und Ablauf

Ein Überblick zum Versuchskonzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Rahmen der Datenerhebung wurden einerseits Baselinedaten zur Leistungsfähigkeit ohne Masken erhoben, andererseits Experimentaldaten aus unterschiedlichen Flugaufgaben, während derer die Versuchspersonen nacheinander beide Sauerstoffmasken trugen. Mit beiden Masken musste zunächst ein Cruise Flight-Szenario bearbeitet werden, bei dem die Probanden simulierte Lotsenkommunikation befolgen sollten. Anschließend wurden zwei Notfallszenarien bearbeitet, indem entsprechende Checklisten abgearbeitet

wurden: ein Szenario mit Druckabfall in der Kabine und ein weiteres mit Rauch im Cockpit.

Vor Beginn der Durchführung bekamen die Probanden ein kurzes Briefing zu den Flugaufgaben und zur Funktionsweise der jeweiligen Maske. Anschließend füllten sie einen biografischen Fragebogen aus und machten sich mit den kognitiven Tests vertraut, für die dann zunächst die Baselineerhebung ohne Maske im Versuchsträger stattfand. Anschließend setzten die Probanden die Masken auf und bearbeiteten den DLT sowie den VST ein zweites Mal (Preflight), bevor die erste Flugaufgabe (Cruise Flight) startete, während der die AST zu bearbeiten war. Nach 20 Minuten war diese Phase beendet und die Probanden bearbeiteten erneut die beiden visuellen kognitiven Tests (After Cruise Flight). Abschließend wurden die beiden Notfallszenarien durchgeführt; beide dauerten jeweils 10 Min. während derer der AST zu bearbeiten war. Danach hatten die Probanden eine 30-minütige Pause, bevor sie das gesamte Programm mit der jeweils zweiten Maske durchliefen.



Zusammensetzung der Atemluft immer konstant und gleich

Abbildung 2: Versuchskonzept © DLR, freepik.com

Jeweils die Hälfte der Probanden startete mit der alten bzw. der neuen Maske. Die Zuteilung war zufällig. Insgesamt waren die Probanden für etwa 3 Stunden vor Ort.

Ergebnisse

Visuelle Wahrnehmung

In allen visuellen Aufgaben zeigte sich ein sehr hoher Anteil korrekter Reaktionen, der von 95 % bis 100 % für die DLT Wahl-Reaktionsaufgabe und von 92 % bis 96 % für den VST rangierte.

Zur Ermittlung möglicher Leistungsunterschiede im Hinblick auf Hits und Reaktionszeiten für die verschiedenen Versuchsbedingungen wurden ANOVAs mit Messwiederholung für die Faktoren Maske x Messzeitpunkt berechnet. Dabei zeigte sich kein bedeutsamer Effekt des Maskentyps für die Leistung im DLT ($F = 0.06$, $df = 1$, n. s.; s. Abbildung 3). Auch der Effekt des Messzeitpunkts war knapp nicht signifikant ($F = 3.16$, $df = 2$, $p = .06$, $\eta^2 = .16$). Innersubjekt-Kontraste wiesen zwar auf einen signifikanten Leistungsabfall zwischen Baseline und Preflight-Bedingung hin ($F = 9.06$, $df = 1$,

$p < .01$, $\eta^2 = .35$), aber nicht auf eine Leistungsveränderung zwischen Baseline- und After Cruise Flight-Bedingung ($F = 1.7$, $df = 1$, n. s.).

Für den VST zeigten sich vergleichbare Resultate (s. Abbildung 4): Auch hier gab es für die Hits keinen bedeutsamen Effekt der Maske ($F = 0.14$, $df = 1$, n. s.) und keinen Effekt des Messzeitpunkts ($F = 0.79$, $df = 2$, n. s.); die Innersubjekt-Kontraste zwischen den Bedingungen mit und ohne Maske waren hier nicht signifikant.

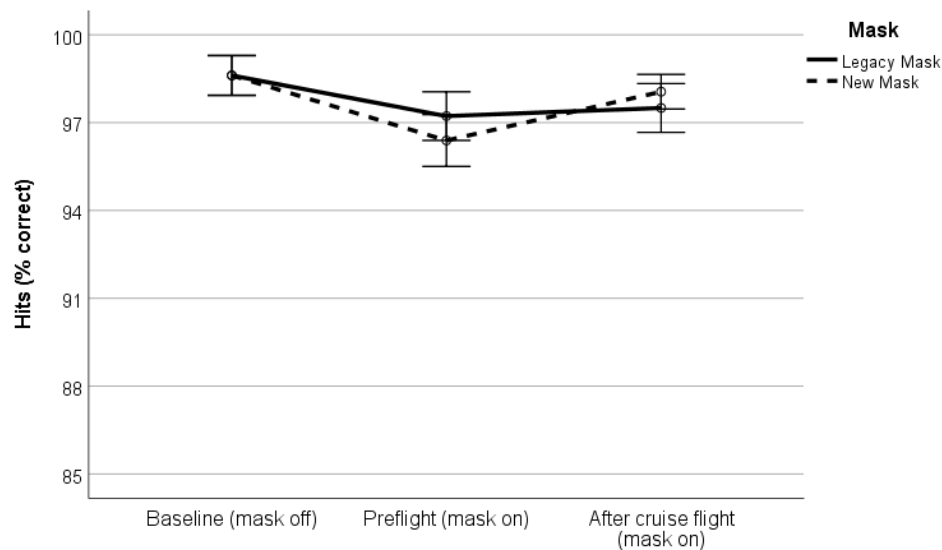


Abbildung 3: Hits für beide Masken und alle Messzeitpunkte in der DLT Wahl-Reaktionsaufgabe. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

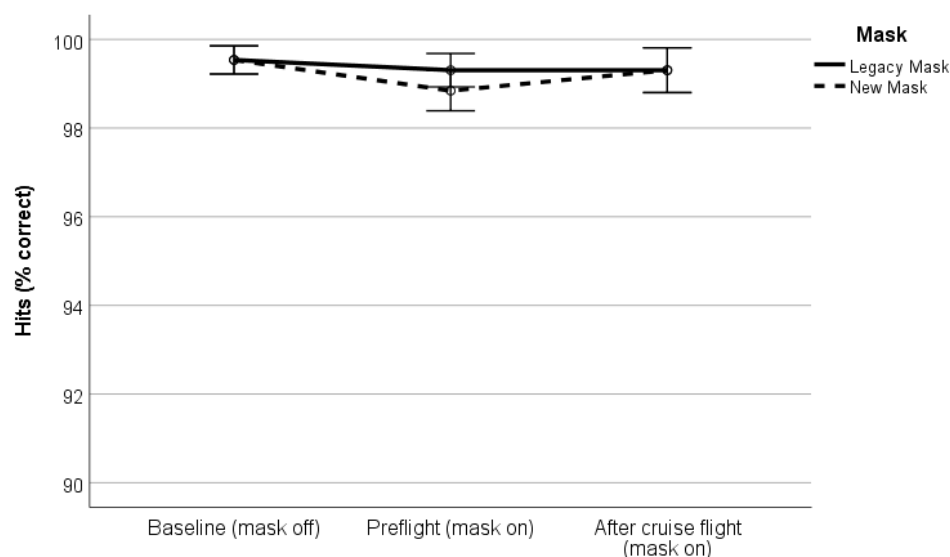


Abbildung 4: Hits für beide Masken und alle Messzeitpunkte im VST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

In Bezug auf die Reaktionszeiten im DLT zeigten sich erneut keine bedeutsamen Effekte für den

Maskentyp ($F = 1.21$, $df = 1$, n. s.) und die Mittelwerte für beide Masken wiesen ein ähnliches Muster auf. Allerdings, wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, ergaben sich hier signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Messzeitpunkten. In den Bedingungen, in denen eine Maske getragen wurde, d.h. in der Preflight- und in der After Cruise Flight-Bedingung, waren die Reaktionszeiten signifikant langsamer als in der Baseline ohne Maske ($F = 7.75$, $df = 2$, $p < .01$, $\eta^2 = .31$).

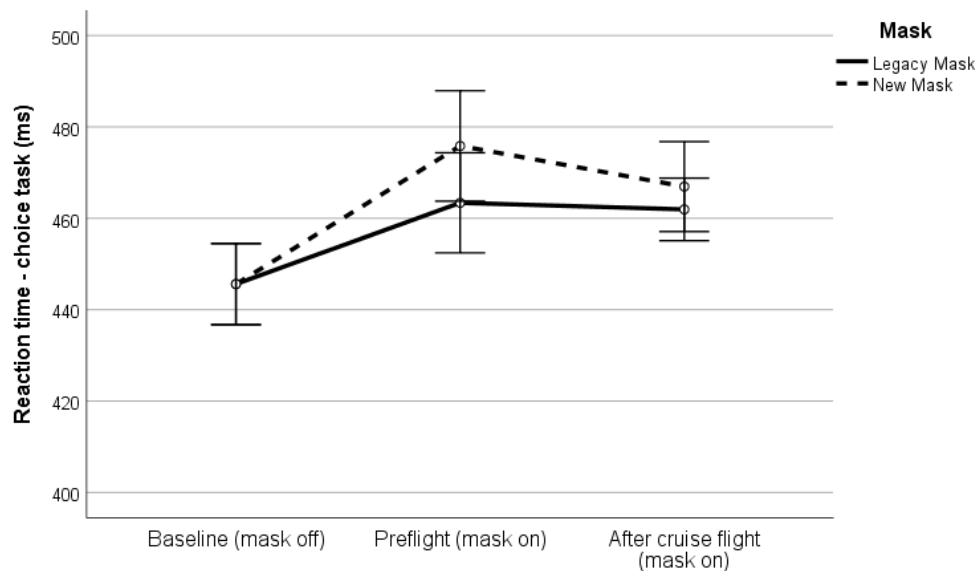


Abbildung 5: Reaktionszeiten (ms) für beide Masken und alle Messzeitpunkte im DLT. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

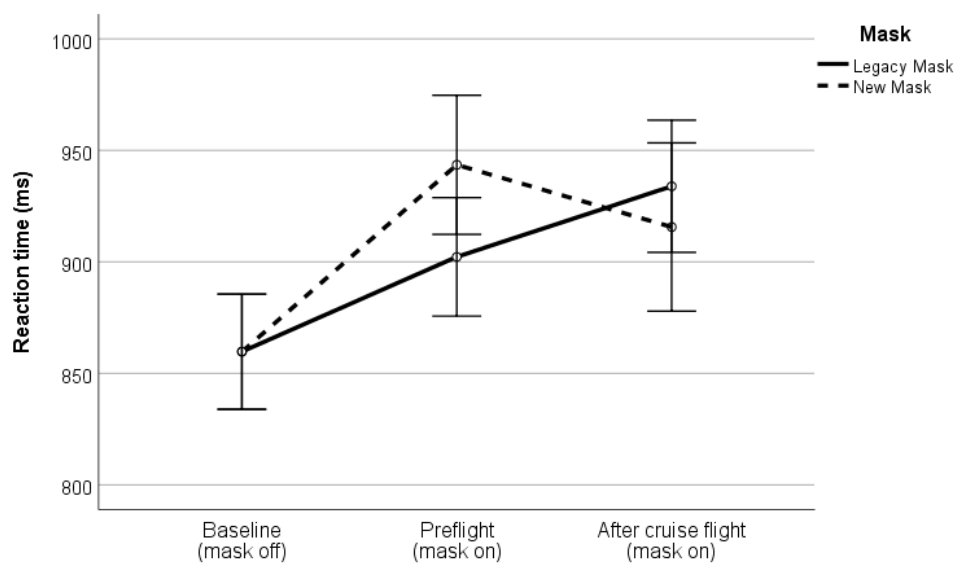


Abbildung 6: Reaktionszeiten (ms) für beide Masken und alle Messzeitpunkte im VST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

Vergleichbare Ergebnisse zeigten sich für den VST: Reaktionszeiten unterschieden sich nicht in Abhängigkeit von der getragenen Maske ($F = .16$, $df = 1$, n. s.), wohl aber in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt ($F = 5.09$, $df = 2$, $p < .05$, $\eta^2 = .23$). Auch für den VST waren die Reaktionszeiten im Vergleich zur Baseline signifikant höher, wenn die Probanden bei Bearbeitung der Aufgabe eine Maske trugen (Abbildung 6).

Akustisches Gedächtnis

Um die kognitive Leistung im AST zu analysieren, wurden weitere ANOVAs mit Messwiederholung für die Faktoren Maske x Messzeitpunkt berechnet. Dabei wurden separate Analysen für die Einfach- und Mehrfacharbeitsbedingungen vorgenommen (s. *Methode*).

Parallel zu den visuellen Aufgaben zeigte sich auch für die akustische Aufgabe des AST unter Einfachbedingungen, d.h. wenn die Aufgabe als einzige Hauptaufgabe zu bearbeiten war, kein Effekt des Maskentyps; weder bezogen auf die Hits ($F = 0.06$, $df = 1$, n. s.; Abbildung 7) noch bezogen auf die Reaktionszeiten ($F = 0.55$, $df = 1$, n. s.; Abbildung 8). Auch der Messzeitpunkt hatte keine Auswirkung auf den Anteil korrekter Reaktionen ($F = 2.23$, $df = 2$, n. s.). Allerdings ergaben sich tendenzielle Leistungseinbußen von der Baseline ohne Maske hin zur Cruise-Bedingung mit Maske, wo die Leistung etwas ungenauer wurde ($F = 4.46$, $df = 1$, $p < .10$, $\eta^2 = .22$; Abbildung 7). Für die Reaktionszeiten konnte allerdings kein vergleichbarer Leistungsabfall identifiziert werden ($F = 0.35$, $df = 2$, n. s.; Abbildung 8).

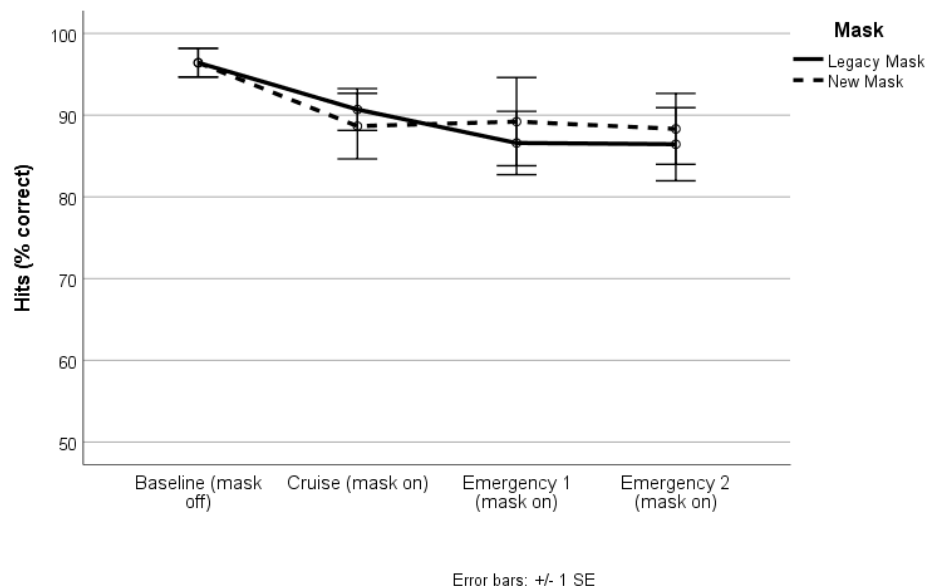


Abbildung 7: Hits für beide Masken unter Einfacharbeitsbedingungen für alle Messzeitpunkte im AST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

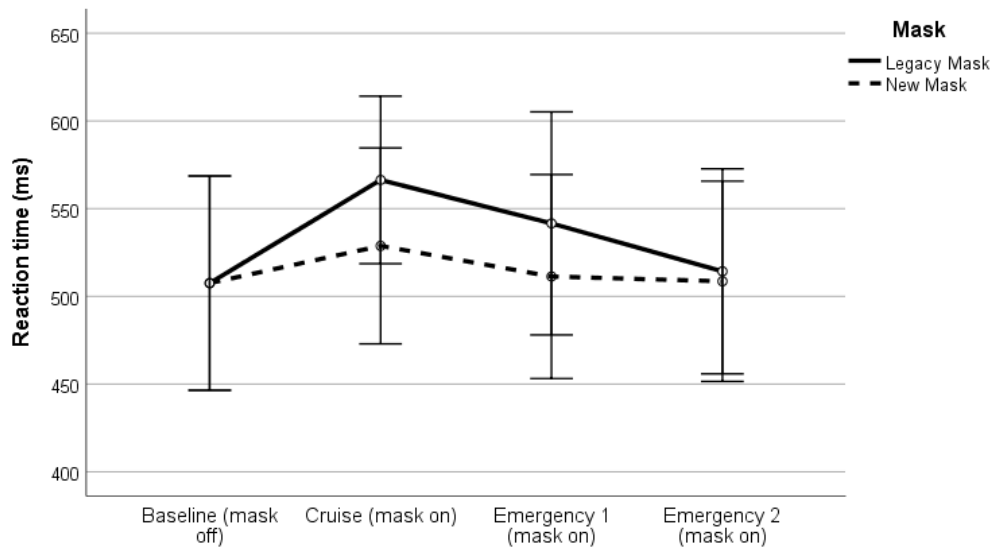


Abbildung 8: Reaktionszeiten (ms) für beide Masken unter Einfacharbeitsbedingungen für alle Messzeitpunkte im AST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

Für die Leistung der Versuchspersonen in der AST unter Mehrfacharbeitsbedingungen, d.h. die Aufgabe musste parallel zu anderen Aufgaben bearbeitet werden, ergab sich ein unerwarteter tendenzieller Effekt des Maskentyps auf den Anteil korrekter Reaktionen ($F = 3.89$, $df = 1$, $p < .10$, $\eta^2 = .20$), aber – wie im Falle der restlichen abhängigen Variablen – war keine Signifikanz für die Reaktionszeiten auszumachen ($F = 0.94$, $df = 1$, n. s.). Dafür hatte der Messzeitpunkt einen starken Effekt im Hinblick auf die Hits im AST: Beim Tragen einer Maske nahm der Anteil korrekter Reaktionen im Laufe der Zeit deutlich ab ($F = 48.73$, $df = 3$, $p < .01$, $\eta^2 = .75$; Abbildung 9). Parallel dazu wurden die Reaktionszeiten mit beiden Masken über den Verlauf der Messzeitpunkte hinweg signifikant langsamer ($F = 9.48$, $df = 3$, $p < .01$, $\eta^2 = .39$; Abbildung 10).

Weiterhin zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen Maske und Messzeitpunkt für die Hits ($F = 3.21$, $df = 3$, $p < .05$, $\eta^2 = .17$). Die Leistung mit der Maske war demnach unterschiedlich in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt, wobei die Leistung mit der herkömmlichen Maske (legacy mask) stärker abnahm als die Leistung mit der neuen Maske (s. Abbildung 9). Für die Reaktionszeiten war die Interaktion zwischen Maske und Messzeitpunkt jedoch nicht bedeutsam ($F = .92$, $df = 3$, n. s.).

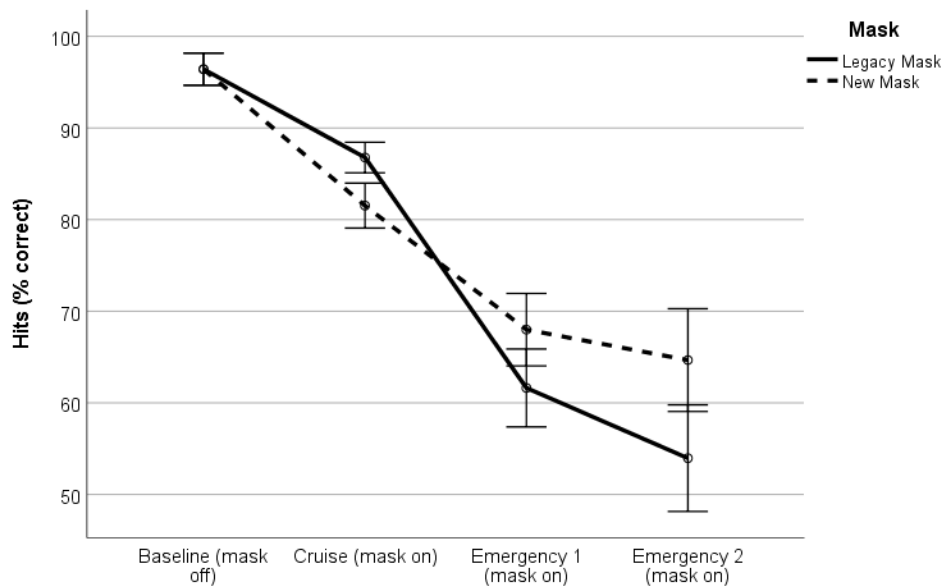


Abbildung 9: Hits für beide Masken unter Mehrfacharbeitsbedingungen für alle Messzeitpunkte im AST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

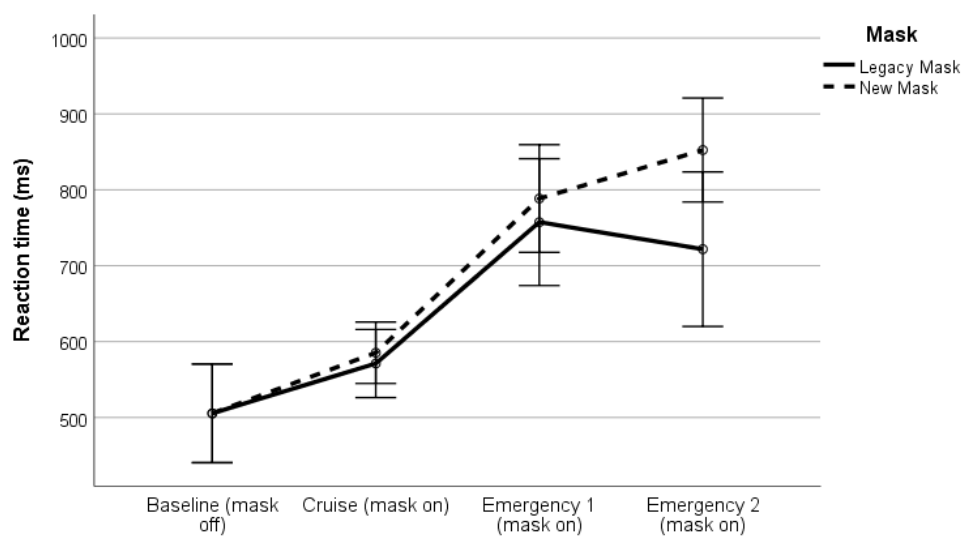


Abbildung 10: Reaktionszeiten für beide Masken unter Mehrfacharbeitsbedingungen für alle Messzeitpunkte im AST. Fehlerbalken entsprechen ± 1 SD.

Diskussion und praktische Implikationen

Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine tiefergehende Analyse möglicher Leistungsparameter lohnenswert ist, um die Effekte des Tragens von Sauerstoffmasken auf kognitive Leistung zu ermitteln. Während sich insgesamt betrachtet keine Unterschiede zwischen den untersuchten Maskentypen aufzeigen ließen, zeigten sich sehr wohl Unterschiede für die untersuchten Leistungsparameter: mit Maske war die visuelle kognitive Leistung im Sinne der Reaktionsgeschwindigkeit signifikant verringert. Für die akustische Leistung ergaben sich

Leistungseinbußen bei erhöhter Arbeitsbelastung sowohl für den Anteil korrekter Antworten als auch für die Reaktionsgeschwindigkeit. Da die Atemluftzusammensetzung im vorliegenden Versuch durchweg konstant war, kann diese nicht zur Erklärung der Leistungseinbußen herangezogen werden. Vielmehr ist anzunehmen, dass die visuelle Leistung durch Verzögerungen im Informationsverarbeitungsprozess gestört wurde: Sicht und Wahrnehmung als erste Schritte der Informationsverarbeitung (Wickens & Carswell, 2022) wurden durch die Maske beeinträchtigt, was zur Verlangsamung der Reaktionen führte. Für das akustische Gedächtnis spielten diese Prozesse keine Rolle, daher kam es hier – unter Einfacharbeitsbedingungen – zu keiner Verminderung der Leistung. Die Leistungseinbußen unter Mehrfacharbeitsbedingungen könnten auf generelle Kapazitätsgrenzen zurückgehen: Werden bereits viele Ressourcen durch hohe Aufgabenerfordernisse beansprucht, führt eine zusätzliche Belastung durch das Masketragen zu verringerter kognitiver Leistungsfähigkeit.

Praktische Relevanz erlangen die Ergebnisse, da in einem hochkritischen Umfeld wie der Fliegerei bereits geringe Einschränkungen negative Einflüsse auf die Flugsicherheit haben können. Umso wichtiger erscheint es, bei der Entwicklung und Bewertung neuer Sauerstoffmasken (oder auch anderer technischer Geräte) die Auswirkungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit der Nutzer auf mehreren Ebenen zu berücksichtigen.

Förderung

Dieses Projekt wurde vom Joint Undertaking Clean Sky 2 (JU) im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 945583; CS2-LPA-GAM-2020-2023-01 finanziert. Das JU erhält Unterstützung aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union und von den Mitgliedern des JU Clean Sky 2, die nicht der Union angehören.

Literatur

- AlGhamri, A.A., Murray, S.L., & Samaranayake, V.A. (2013). The effects of wearing respirators on human fine motor, visual, and cognitive performance. *Ergonomics*, 56, 791–802. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.767383>
- Caretti, D.M. (1999). Cognitive performance and mood during respirator wear and exercise. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 60, 213–218. <http://dx.doi.org/10.1080/00028899908984438>
- Caretti, D. M., Bay-Hansen, L. A., & Kuhlmann, W. D. (1995). Cognitive performance during respirator wear in the absence of other stressors. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56, 776–781. [10.1080/15428119591016593](https://doi.org/10.1080/15428119591016593)
- Deary, I. J., David Liewald, & Nissan, J. (2011). A free, easy-to-use, computer-based simple and four-choice reaction time programme: The Deary-Liewald reaction time task. *Behavioral Research*, 43, 258–268. <https://doi.org/10.3758/s13428-010-0024-1>
- European Aviation Safety Agency (2023). *Easy Access Rules for Air Operations*. Regulation (EU) No 965/2012.
- Goeters, K.-M., Maschke, P., & Eißfeldt, H. (2004). Ability requirements in core aviation profession. Job analyses of airline pilots and air traffic controllers. In K.-M. Goeters (Ed.), *Aviation Psychology: Practice and research* (pp. 99-119). Aldershot: Ashgate.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Perrig, W. J., & Meier, B. (2010). The concurrent validity of the N-back task as a working memory measure. *Memory*, 18, 394–412. <https://doi.org/10.1080/09658211003702171>
- Lee, W., Yang, X., Jung, D., Park, S., Kim, H., & You, H. (2018). Ergonomic evaluation of pilot oxygen mask designs. *Applied Ergonomics: Human Factors in Technology and Society*, 67, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.003>
- Maier, J., Albers, F., Oubaid, V., Fromage, M., & Dupuy, J.-B. (2022). Evaluation of a next generation oxygen system – assessment of usability, comfort and human performance. *Transportation Research Procedia*, 66, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.011>
- Peacock, C. A., Weber, R., Sanders, G. J., Seo, Y., Kean, D., Pollock, B. S., Burns, K. J., Cain, M., LaScola, P., & Glickman, E. L. (2017). Pilot physiology, cognition and flight performance during flight simulation exposed to a 3810-m hypoxic condition. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 23, 44–49. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1234685>
- Sausen, K. P., Wallick, M. T., Slobodnik, B., Chiniak, J. M., Bower, E. A., Stiney, M. E., & Clark, J. B. (2001). The Reduced Oxygen Breathing Paradigm for Hypoxia Training: Physiological, Cognitive, and Subjective Effects. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 72, 539–545.
- Treisman, A. (1982). Perceptual grouping and attention in visual search for features and for objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8, 194–214.
- Wickens, C. D., & Carswell, C. M. (2022). Information processing. In G. Salvendy & W. Karwalski (Eds.), *Handbook of human factors*. CRC Press.
- Zimmerman, N. J., Eberts, C., Salvendy, G., & McCabe, G. (1991). Effects of respirators on performance of physical, psychomotor and cognitive tasks. *Ergonomics*, 34, 321–334. <https://doi.org/10.1080/00140139108967316>