

Zeitliche Sensitivität okularer Parameter zur Gestaltung beanspruchungsadaptiver Mensch-Maschine-Schnittstellen

Elena WOLF, Marco WETTER, Barbara DEML

*Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe*

Kurzfassung: Im Kontext personenadaptiver Schnittstellen ist es notwendig, den Zeitpunkt einer hohen mentalen Beanspruchung, bspw. bei Überforderung, von den Zuständen geringer bis mäßiger mentaler Beanspruchung psychophysiologisch abzugrenzen. Mit dem Anspruch einer geringen Latenzzeit ist zudem zu spezifizieren, welches Zeitfenster im okularen Signal ausreichend ist, um eine valide Beanspruchungsprädiktion zu gewährleisten. Um diese Punkte genauer zu untersuchen, wurde ein Laborexperiment mit einer systematischen Variation der mentalen Beanspruchung durchgeführt. Dabei bearbeiteten 48 Probanden drei Balltrackingaufgaben an einem Computer, wobei der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben in festen Zeitintervallen stetig anstieg. Zur Identifikation eines hohen mentalen Beanspruchungszustandes bei gleichzeitiger Berücksichtigung der interindividuellen Beanspruchungssensitivität wurden die Versuchspersonen instruiert, das Schwierigkeitsniveau der Aufgabe bei subjektiver mentaler Überforderung durch einen Tastendruck eigenständig zu verringern. Ausgehend vom Drücken der Taste wurden die okularen Parameter, Pupillendurchschnitt, Index of Cognitive Activity (Marshall, 2000) und Fixationsdauer, in unterschiedliche Zeitsegmente (5, 10 und 20 Sek.) unterteilt und in Hinblick auf ihre Vorhersagegüte der mentalen Überforderung verglichen. Die Implikationen der Ergebnisse für den Einsatz okularer Parameter im Zusammenhang mit adaptiven Mensch-Maschine-Schnittstellen werden diskutiert.

Schlüsselwörter: Mentale Beanspruchung, okulare Parameter, adaptive Mensch-Maschine-Schnittstelle

1. Theoretischer Hintergrund

Der erfolgreiche Einzug intelligenter Mensch-Maschine-Systeme in die Arbeitswelt von heute stellt die Entwicklung personenadaptiver Schnittstellen zunehmend in den Fokus der Forschung. Eine Aufgabe personenadaptiver Schnittstellen ist es, den Nutzerzustand mit objektiv messbaren und validen Indikatoren (z.B. okulare Parameter) abzuleiten und bei Bedarf eine Unterstützung im Arbeitsprozess zur Verfügung zu stellen. Ein relevanter Nutzerzustand im Bereich der Arbeitswelt stellt das psychologische Konstrukt der mentalen Beanspruchung dar. Gemäß Wickens et al. (2013) ist die mentale Beanspruchung ein ressourcenabhängiger Prozess, bei dem Ressourcen aus der limitierten Informationsverarbeitungskapazität des Menschen während der Aufgabenbearbeitung verbraucht werden.

Zur Messung der mentalen Beanspruchung im laufenden Arbeits- und Handlungsprozess können bio-physiologische Indikatoren genutzt werden, welche es erlauben, eine kontinuierliche Messung durchzuführen, ohne den Arbeitsprozess zu stören

oder zu unterbrechen. Bewährte bio-physiologische Indikatoren der mentalen Beanspruchung sind okulare Parameter, wie die größere durchschnittliche Pupillenweite (Diameter; Marshall, 2002; Steinhäuser, Siegle, Condray & Pless, 2004) und die erhöhte Pupillendurchschnittsvariabilität, repräsentiert durch den Index of Cognitive Activity (ICA; Marshall, 2000; Marshall, 2002). Ein weiterer Parameter ist die Fixationsdauer, welche unter Belastungssituationen aufgrund der erhöhten Zeit zur Verarbeitung der Blickinformationen ansteigt (Bucks & Walrath, 1992).

Die Herausforderung einer beanspruchungsadaptiven Mensch-Maschine-Schnittstelle besteht darin, den Zustand einer hohen mentalen Beanspruchung, bspw. bei Überforderung, von den Zuständen einer geringen bis mäßigen mentalen Beanspruchung psychophysiologisch abzugrenzen. In diesem Zusammenhang stellt sich neben einer validen Beanspruchungsindikation die weitere Herausforderung einer geringen Latenzzeit in der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Folglich ist zu spezifizieren, über welches Zeitfenster (Δt) im Aufgabenverlauf die Parameter berechnet werden sollen, um noch eine zuverlässige Beanspruchungsprädiktion zu gewährleisten, aber auch, wie sich die okularen Parameter in unterschiedlichen Beanspruchungsphasen (z. B. hohe vs. geringe mentale Beanspruchung) verhalten. Zu diesem Zweck wurden explorativ die Zeitfenster von 5, 10 und 20 Sek. bei einer systematischen Beanspruchungsvariation untersucht.

2. Methode

2.1 Stichprobe

Das Experiment wurde mit 48 freiwilligen Probanden durchgeführt. Davon waren 50.6% weiblich und 56.3 % Studenten. Der Altersdurchschnitt lag bei $M = 30.8$ ($SD = 12.5$).

2.2 Experimentaldesign und Versuchsdurchführung

Durchgeführt wurde eine Laborstudie mit einem quasiexperimentellen Versuchsdesign und intraindividuelle Bedingungsvariation. Als Versuchsaufgabe wurden drei Balltrackingaufgaben (Balltrackingaufgabe A, B und C) am Computer bearbeitet. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurden die Aufgaben in einer randomisierten Reihenfolge vorgegeben. Das Ziel bei allen Balltrackingaufgaben bestand darin, innerhalb von drei Minuten einen sich zufällig über den Computerbildschirm bewegenden Ball mit dem Mauszeiger zu verfolgen und zu treffen. Zur Operationalisierung unterschiedlicher mentaler Beanspruchungszustände nahm die Schwierigkeit der Balltrackingaufgaben in einem Zeitintervall von 30 Sek. kontinuierlich zu. Zu diesem Zweck wurde die Geschwindigkeit des Balles erhöht. Dadurch konnte der Schwierigkeitsgrad um bis zu 5 Stufen ansteigen. Der Unterschied zwischen den drei Balltrackingaufgaben bestand in der Anzahl der Distraktorbälle, welche sich zusätzlich zu dem Zielball zufällig auf dem Computerbildschirm mit der gleichen Geschwindigkeit bewegten. Um den Zielball als solchen zu identifizieren, leuchtete dieser bei Aufgabenstart für 3 Sek. hellblau auf und nahm danach die gleiche dunkelblaue Farbe an wie die restlichen Distraktorbälle. Sobald der Zielball von dem Mauszeiger berührt wurde, leuchtete dieser für die Dauer des Kontakts wieder hellblau auf. Während in der Balltrackingaufgabe A neben dem Zielball nur ein einziger Distraktorball vorgegeben wurde, wurden in der Balltrackingaufgabe B 20 Distraktorbälle simultan präsentiert. Im Gegensatz dazu startete die Balltrackingaufgabe C mit nur einem Distraktor-

ball und erhöhte die Anzahl der Distraktorbälle auf 20, nachdem die Schwierigkeitsstufe 2 erreicht wurde.

Das Ziel der Versuchsaufgabe bestand darin, Phasen hoher mentaler Beanspruchung von den Phasen geringer bzw. mäßiger mentaler Beanspruchung voneinander abzugrenzen. Da der Einsatz subjektiver Messmethoden, wie Fragebögen, eine Unterbrechung im Aufgabenverlauf bedeutet, wurde ein Verhaltensmaß verwendet: Alle Probanden wurden dazu instruiert, bei subjektiv empfundener Überforderung – beispielsweise bei übermäßiger Ballgeschwindigkeit – eine Art Unterstützungsfunktion durch das Klicken der mittleren Maustaste anzufordern. Als Folge der Unterstützungsanforderung reduzierte sich die Ballgeschwindigkeit um zwei Schwierigkeitsstufen und der Zielball leuchtete für 3 Sek. hellblau auf, um diesen als solchen identifizieren zu können. Da jeder Proband durch das aktive Anfordern der Unterstützung eigenständig entscheiden kann, wann der Zeitpunkt einer Überforderung gekommen ist, gewährleistet dieses Verhaltensmaß die Berücksichtigung der interindividuellen Beanspruchungssensitivität. Der weitere Aufgabenverlauf folgte den beschriebenen aufsteigenden Schwierigkeitsstufen. Insgesamt dauerte das Experiment ca. 30 Min.

2.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Während des Versuchs wurden die okularen Parameter Diameter, ICA und Fixationsdauer mit Hilfe eines kopfgetragenen binokularen Eye-Tracking Systems von Pupil-Labs (Kassner, Patera & Bulling, 2014) mit einer Aufnahmezeit von 60 Hz erfasst. Die Parametrisierung erfolgte für jede Balltrackingaufgabe sowie jedes Zeitintervall gemäß den Vorgaben aus der Literatur (z. B. Marshall, 2000). Um die Reliabilität der okularen Parameter zu gewährleisten, wurden alle Zeitintervalle mit einer Aufnahmesicherheit $< .9$ (Range: 0 – 1.0) aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Aufteilung eines Aufgabenverlaufs in die Zeitintervalle ($\Delta t = 5, 10$ oder 20 Sek.) orientierte sich hierbei an dem Zeitpunkt der Unterstützungsanforderung durch den Probanden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, diente das Anfordern der Unterstützung als Ausgangspunkt der Unterteilung in drei Zeitphasen vor der Unterstützungsanforderung (prä 1, prä 2 und prä 3) und in eine Phase nach der Unterstützungsanforderung (post 4). Alle restlichen Zeitphasen wurden mit 0 annotiert.

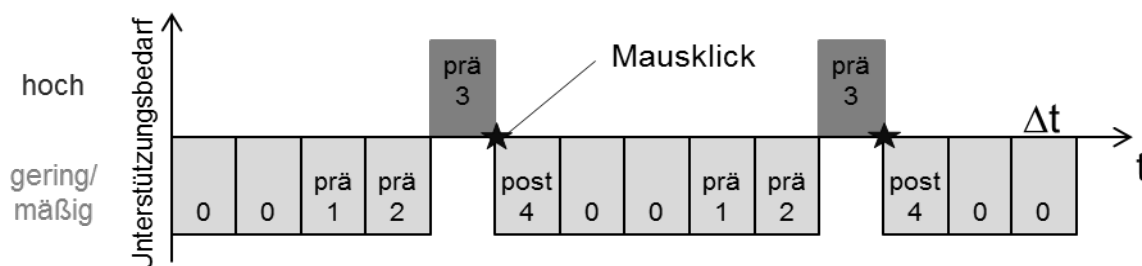


Abbildung 1: Aufteilung der okularen Parameter in die Zeitintervalle Δt ausgehend von der Unterstützungsanforderung durch den Mausclick sowie die Annotation der Phasen.

3. Ergebnisse

Die Datenauswertung ist in zwei Abschnitte untergliedert. In Abschnitt 3.1 werden die Unterschiede in zwischen den Phasen um die Unterstützungsanforderung jeweils für die drei Zeitintervalle ($\Delta t = 5, 10$ oder 20 Sek.) und die okularen Parameter untersucht. In Abschnitt 3.2 wird überprüft, mit welcher Treffsicherheit der Unterstüt-

zungsbedarf in der Phase vor der Unterstützungsanforderung durch die okularen Parameter in den unterschiedlichen Δt vorhergesagt werden kann.

Es gingen nur diejenigen Balltrackingaufgaben eines Probanden in die statistische Auswertung mit ein, in denen eine Unterstützung angefordert wurde, wobei zwei Probanden aufgrund fehlender Unterstützungsanforderung im gesamten Aufgabenverlauf komplett aus der Analyse ausgeschlossen wurden. Alle okularen Parameter wurden a priori mit der Yeo-Johnson Power Transformation (Yeo & Johnson, 2000) normalisiert und auf Personenebene z-standardisiert. Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe einer Mehrebenenanalyse mit Zufallseffekten auf Personenebene. Zudem wurden Zufallseffekte auf Ebene der Balltrackingaufgabe sowie der zeitlichen Reihenfolge spezifiziert, um den Einfluss der unterschiedlichen Aufgaben A bis C sowie den zeitlichen Verlauf im Gesamtablauf zu kontrollieren.

3.1 Unterschiede zwischen den Phasen in den okularen Parametern

ICA. Für den ICA zeigt sich ein signifikanter Unterschied sowohl zwischen den Phasen in $\Delta t = 5$ Sek. ($\chi^2(4) = 154.78, p < .001$), als auch zwischen den Phasen in $\Delta t = 10$ Sek. ($\chi^2(4) = 162.33, p < .001$) und $\Delta t = 20$ Sek. ($\chi^2(4) = 67.23, p < .001$). Die Kontrastanalyse zeigt für alle Δt , dass nur die Phase kurz vor der Unterstützungsanforderung (prä 3) im Vergleich zu allen anderen Phasen (0, prä 1, prä 2, post 4) einen signifikant höheren ICA aufweist (siehe Abbildung 2 oben). Aus Platzgründen werden hier exemplarisch nur die Ergebnisse für $\Delta t = 5$ Sek. dargestellt: $b_{3-0} = -.91, t(2186) = -12.7, p < .001$; $b_{3-1} = -.84, t(2186) = -8.8, p < .001$; $b_{3-2} = -.84, t(2186) = -8.8, p < .001$; $b_{3-4} = -.83, t(2186) = -8.6, p < .001$.

Diameter. Auch der Pupillendurchmesser zeigt für alle drei Zeitintervalle signifikante Unterschiede zwischen den Phasenabschnitten: $\Delta t = 5$ Sek.: $\chi^2(4) = 199.61, p < .001$; $\Delta t = 10$ Sek.: $\chi^2(4) = 181.3, p < .001$; $\Delta t = 20$ Sek.: $\chi^2(4) = 87.92, p < .001$. Ein signifikanter Anstieg des Pupillendurchmessers findet sich hierbei in allen Δt für die Phase prä 3 im Vergleich zu allen anderen Phasen (siehe Abbildung 2 Mitte), exemplarisch dargestellt für $\Delta t = 5$ Sek.: $b_{3-0} = -.97, t(2186) = -13.7, p < .001$; $b_{3-1} = -.63, t(2186) = -6.6, p < .001$; $b_{3-2} = -.53, t(2186) = -5.6, p < .001$; $b_{3-4} = -.83,$

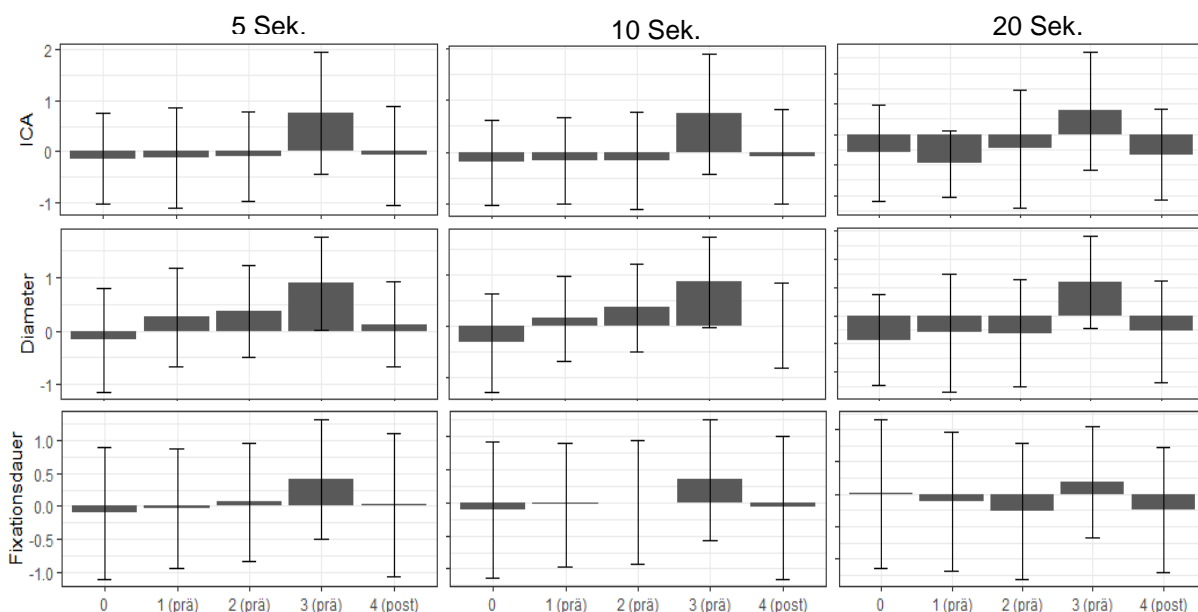


Abbildung 2: Balkendiagramm mit M und SD für die okularen Parameter ICA (oben), Diameter (Mitte) und Fixationsdauer (unten) gruppiert nach den Zeitintervallen 5, 10 und 30 Sek.

$t(2186) = -8.8, p < .001$. Zudem ist bereits ein signifikanter Anstieg im Diameter in den vorangehenden Phasen prä 1 und prä 2 im Vergleich zur Phase 0 zu verzeichnen, hier exemplarisch dargestellt für $\Delta t = 5$ Sek.: $b_{0-1} = .35, t(2186) = 4.9, p < .001$; $b_{0-2} = .45, t(2186) = 6.2, p < .001$; $b_{1-2} = .10, t(2186) = 1.1, p = .283$.

Fixationsdauer. Unterschiede zwischen den Phasenabschnitten finden sich auch für die Fixationsdauer in $\Delta t = 5$ Sek. ($\chi^2(4) = 54.28, p < .001$), $\Delta t = 10$ Sek. ($\chi^2(4) = 29.93, p < .001$) und $\Delta t = 20$ Sek. ($\chi^2(4) = 22.85, p < .001$). Für $\Delta t = 5$ und 10 Sek. zeigt die Kontrastanalyse einen signifikanten Anstieg in der Fixationsdauer für die Phase prä 3 im Vergleich zu allen anderen Phasen (siehe Abbildung 2 unten), hier dargestellt für $\Delta t = 5$ Sek.: $b_{3-0} = -.51, t(2513) = -7.4, p < .001$; $b_{3-1} = -.45, t(2513) = -4.8, p < .001$; $b_{3-2} = -.35, t(2513) = -3.7, p < .001$; $b_{3-4} = -.40, t(2513) = -4.2, p < .001$. Für $\Delta t = 20$ Sek. zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen prä 3 und 0 bzw. prä 1.

3.2 Vorhersage der Unterstützungsanforderung durch okulare Parameter

Zur Vorhersage des Unterstützungsbedarfs durch okulare Parameter wird eine Mehrebenenanalyse mit den Prädiktoren ICA, Diameter und Fixationsdauer berechnet. Das Kriterium ist hierbei die dichotome Variable Unterstützungsbedarf mit den Ausprägungen *geringer/mäßiger* und *hoher* Unterstützungsbedarf (Abbildung 1), welche durch eine Binomial-Verteilung im Regressionsmodell berücksichtigt wird.

Für $\Delta t = 5$ Sek. findet sich eine signifikante Devianzreduktion des Modells durch den Prädiktor ICA ($\chi^2(1) = 110.53, p < .001$; $b = .71, z(2154) = 9.8, p < .001$), Pupillendurchschnitt ($\chi^2(1) = 143.19, p < .001$; $b = 1.04, z(2154) = 10.3, p < .001$) und Fixationsdauer ($\chi^2(1) = 17.01, p < .001$; $b = .36, z(2154) = 4.3, p < .001$). Zur Bestimmung der Vorhersagegüte (siehe Abbildung 3) wird die Anzahl der richtig vorhergesagten Werte berechnet, wobei alle vorhergesagten Wahrscheinlichkeitswerte $p > .1$ als hoher Unterstützungsbedarf und alle Werte $p \leq .1$ als geringer/mäßiger Unterstützungsbedarf gewertet werden. Die Treffsicherheit liegt für dieses Vorhersagemodell bei 80.9 % mit 19.8 % falsch negativer (FN) und 19.1% falsch positiver (FP) Treffer. Für die Zeitintervalle $\Delta t = 10$ und 20 Sek. zeigen sich die gleichen signifikanten Effektmuster, welche aus Platzgründen nicht aufgeführt werden. Die Treffsicherheit für das Vorhersagemodell liegt bei 83.5 % bei $p > .2$ (FN: 25 %, FP: 14.9 %) für $\Delta t = 10$ Sek. und 79.3 % bei $p > .4$ (FN: 19.1 %, FP: 21.7 %) für $\Delta t = 20$ Sek.

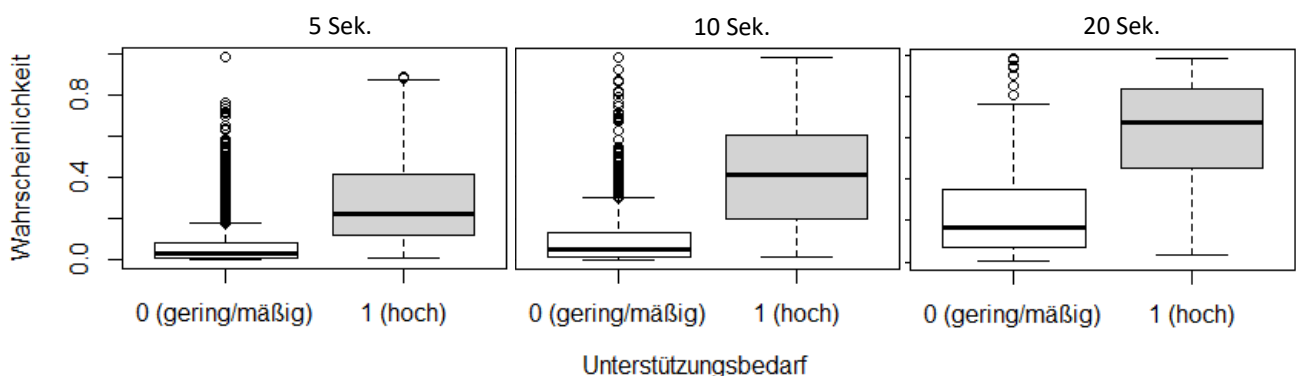


Abbildung 3: Vorhergesagte Wahrscheinlichkeit für Unterstützungsbedarf für $\Delta t = 5, 10$ und 20 Sek.

4. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die okularen Parameter (ICA, durchschnittliche Pupillenweite und Fixationsdauer) in der Phase direkt vor dem aktiven Betätigen der Unterstützungsfunktion signifikant höher sind als in den anderen Phasen des Aufgabenverlaufs. Dieser Effekt ist signifikant für alle drei Zeitintervalle von 5, 10 und 20 Sek. Die Richtung der Veränderung in den okularen Parametern entspricht dabei den Befunden bisheriger Studien, die eine höhere durchschnittliche Pupillenweite, einen höheren ICA und eine längere Fixationsdauer unter mentaler Beanspruchung berichten (z. B. Bacs & Walrath, 1992, Marshall, 2002). Die vorliegenden Ergebnisse zeigen somit, dass Phasen mit hohem Unterstützungsbedarf mit einer signifikant höheren mentalen Beanspruchung assoziiert sind als Phasen mit geringem bis mäßigem Unterstützungsbedarf. Bei der Vorhersage des Unterstützungsbedarfs durch die drei okularen Parameter ist zu erkennen, dass die Parameter durchschnittliche Pupillenweite ($\chi^2(1) = 143.19$) und ICA ($\chi^2(1) = 110.53$) einen deutlich höheren Beitrag zur Modellgüte leisten als die Fixationsdauer ($\chi^2(1) = 17.01$). Diese Befunde zeigen sich für alle drei Zeitintervalle und lassen darauf schließen, dass die Parameter Pupillendurchschnitt und ICA die wesentlichen Prädiktoren in der Beanspruchungsdetektion darstellen. In Bezug auf die Treffsicherheit, die falsch positiven und negativen Werte finden sich nur geringe Unterschiede zwischen den drei Zeitintervallen (ca. 80 %), sodass bereits sehr kleine Zeitintervalle von 5 Sek. eine ebenso so gute Treffsicherheit bieten wie größere Zeitintervalle von 10 und 20 Sek.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass bereits kurze Zeitintervalle von 5 Sek. geeignet sind, um eine Erhöhung in der mentalen Beanspruchung durch okulare Parameter festzustellen. Zur Indikation mentaler Beanspruchung in personenadaptiven Schnittstellen können folglich kurze Zeitfenster von 5 Sek. verwendet werden und somit eine geringe Latenzzeit gewährleistet werden.

5. Literatur

- Bacs, R., Walrath L. (1992) Eye movement and pupillary response indices of mental workload during visual search of symbolic displays. *Appl Ergon* 23:243-254.
- Beatty J, Lucero-Wagoner B (2000) The Pupillary System. In: Cacioppo J, Tassinari L, Berntson G (eds) *Handbook of psychophysiology*. University Press, Cambridge, pp 142-162.
- Kassner, M., Patera, W. & Bulling, A. (2014) Pupil: an open source platform for pervasive eye tracking and mobile gaze-based interaction. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*. ACM, 1151–1160.
- Marshall S (2000) Patentnummer. 6,090,051. USA.
- Marshall S (2002) The index of cognitive activity: measuring cognitive workload. *IEEE Human Factors Meeting*, 7, Scottsdale.
- Steinhauser S, Siegle G, Condray R, Pless M (2004) Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing. *Int J Psychophysiol* 52:77-86.
- Wickens, C. D. (2002): Multiple resources and performance prediction. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3 (2), S. 159–177.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S. & Parasuraman, R. (2013) *Engineering psychology and human performance*. (4. Aufl.). Boston: Pearson.
- Yeo, I. & Johnson, R. A. (2000) A New Family of Power Transformations to Improve Normality or Symmetry. *Biometrika*, Series B. 87 (4): 954–959.

Danksagung: Diese Arbeit wurde im Rahmen des BMBF geförderten Projekts „Kontextsensitive Assistenz im aufmerksamen OP: KonsensOP“ durchgeführt. Die Autoren bedanken sich für die Förderung sowie für die Unterstützung der Projektpartner und der wissenschaftlichen Hilfskräfte.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(F)T
Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung

64. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FOM Hochschule für
Oekonomie & Management gGmbH

21. – 23. Februar 2018

GfA Press

Bericht zum 64. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 21. – 23. Februar 2018

FOM Hochschule für Oekonomie & Management

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2018

ISBN 978-3-936804-24-9

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

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.

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

USB-Print:

Prof. Dr. Thomas Heupel, FOM Prorektor Forschung, thomas.heupel@fom.de

Screen design und Umsetzung

© 2018 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de