

Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen

Nils Darwin ABELE, Karsten KLUTH

*Fachgebiet Arbeitswissenschaft/Ergonomie, Universität Siegen
Paul-Bonatz-Straße 9-11, D-57068 Siegen*

Kurzfassung: Schnelles und effizientes Lernen ist als Reaktion auf dynamische Märkte und sich ständig ändernde Arbeitspraktiken eine notwendige Anforderung an moderne Arbeitsplätze. Der Wissens- und Erfahrungsaustausch ist dabei ein wesentlicher Bestandteil. Computertechnologien, wie z.B. Cyber-Physische Systeme (CPS), die nach dem Prinzip der Augmented Reality (AR) aufgebaut sind, finden in diesem Zusammenhang Verwendung. In einem Forschungsvorhaben wurde ein derartiges System zur Unterstützung von Einrichtern für Rüstvorgänge an Industriemaschinen entwickelt. Die vorliegende Ausarbeitung evaluiert das Tool hinsichtlich ausgewählter beanspruchungsrelevanter Parameter. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit ein AR-basiertes Tool im industriellen Kontext sowohl aus physiologischer und psychologischer als auch aus unternehmerischer Sicht eingesetzt werden kann.

Schlüsselwörter: Augmented Reality, Cyber-Physische Systeme, Head-Mounted Display, Oberflächen-Elektromyographie, Human-Computer Interaction, Industrielle Rüstprozesse

1. Einleitung

Im industriellen Umfeld steigt infolge des wachsenden Bedarfs kundenindividueller Produkte die Zahl der häufig noch manuell ausgeführten Rüstvorgänge an Maschinen. Die Komplexität der einzelnen Rüstschritte wächst in diesem Zusammenhang und beeinflusst den zeitlichen Aufwand sowie die Qualität des Rüstprozesses (Janssen & Möller 2011). Um unerfahrenen Maschineneinrichtern das notwendige rüstspezifische Wissen effizient aufbereiten zu können, werden zunehmend digitale Lösungen herangezogen. Augmented Reality (AR) kann als neuartige Visualisierungsmöglichkeit ortsbezogene Informationen schnell und einfach übermitteln. Die Forschung zur Anwendung AR-basierter Tools durch praxisnahe Nutzer gilt bis dato aber einerseits als unterrepräsentiert und zeigt andererseits gleichzeitig deren Potential auf (Bhattacharya & Winer 2019). Zudem weisen Head-Mounted Displays (HMD) aufgrund des relativ frühen Entwicklungsstadiums zum Teil ergonomische Limitierungen hinsichtlich deren konstruktiver Gestaltung und Nutzerakzeptanz auf.

Im Zuge des Forschungsprojekts „Cyberrüsten 4.0“ wurde am Beispiel von industriellen Rüstvorgängen an Biegemaschinen eine Applikation für eine Mixed-Reality-Technologie unter Verwendung der Microsoft „HoloLens“ entwickelt (Abele et al. 2016). Das als HMD konzipierte Unterstützungssystem projiziert prozessrelevante Informationen über Hologramme in das Sichtfeld des Nutzers. Vor diesem Hintergrund wurde eine experimentelle Studie mit dem Forschungsziel durchgeführt, auf Grundlage der Erkenntnisse vergangener Studien mögliche Einflussfaktoren auf die

physische und psychische Arbeitsbeanspruchung eines Maschineneinrichters durch die Nutzung eines derartigen Hilfsmittels aufzuzeigen.

2. Stand der Technik

Zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit verfolgen Industrieunternehmen bereits seit den 80er-Jahren die Lean-Philosophie zur kontinuierlichen Suche nach Verbesserungen und zur Eliminierung von Verschwendungen (Miina 2012). Beispiele sind v.a. Just-in-Time (JIT)-Praktiken, wie der Ansatz „Single Minute Exchange of Die“ (SMED) zur Verkürzung von Rüstzeiten (Palanisamy & Siddiqui 2007). Shingo (1985) hat die Bedeutung der Rolle von Maschineneinrichtern neben wirtschaftlichen, konstruktiven und technischen Verbesserungen insbesondere im Hinblick auf deren Qualifikation bzw. Wissensniveau früh erkannt. Aktuell betrachtet der Forschungsbereich Human-Computer Interaction (HCI) diesen Sachverhalt im Hinblick auf die Gestaltung digitaler Visualisierungstechnologien für den Wissenstransfer (Tergan & Keller 2005). Cyber-physische Systeme (CPS) bzw. das Internet of Things (IoT), die in der industriellen Umgebung auch als Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) bzw. Industrial Internet of Things (IIoT) bezeichnet werden, sind dabei Ansätze zum innovativen Handling wissensintensiver Prozesse zugunsten effizienter Arbeitspraktiken (Paelke & Röcker 2015).

AR gilt in diesem Zusammenhang als Wegbereiter des modernen Arbeitsplatzes. Betrachtet man die AR-Technologie bei Lernprozessen in einer industriellen Arbeitsumgebung, ist eine Vielzahl von Studien im Bereich der Montageunterstützung vorhanden (u.a. Tang et al. 2003). Dabei stellte sich heraus, dass ein geringerer Interaktionsaufwand mit einer verbesserten Task-Performance und einer Abnahme des Cognitive Load einhergeht. Der Umgang mit AR-Tools, insbesondere in Form von HMDs, kann jedoch auch zu erhöhten kognitiven Beanspruchungen (Wille 2016) sowie vermehrten physiologischen Beanspruchungen im Schulter-Nacken-Bereich des Nutzers führen (Theis et al. 2016). In diesem Zusammenhang besteht insbesondere im Hinblick auf industrielle Tätigkeiten und binokulare sowie gestengesteuerte AR-Systeme weiterhin Bedarf für ergonomische Untersuchungen auf Basis quantitativer Daten, bspw. unter Anwendung der Oberflächen-Elektromyographie (OEMG, Steinhilber et al. 2013).

Die von Microsoft entwickelte HoloLens stellt eine derartige AR-Technologie dar. Mit den über das HMD visualisierten dreidimensionalen Hologrammen kann mithilfe einer Sprach- und Gestensteuerung interagiert werden (vgl. Microsoft 2018).

In der vorliegenden Ausarbeitung wird auf Grundlage der Studie von Abele (2019) eine Folgestudie vorgestellt, welche die beschriebene Thematik aufgreift.

3. Methode und Versuchsdesign

Die Forschungsarbeit basierte auf einem nutzerzentrierten Designansatz eines IIoT-Tools zur Unterstützung von Maschinenbedienern bei Rüst- bzw. Einrichtvorgängen von Biegemaschinen. Dazu wurde eine Designfallstudie durchgeführt (Wulf et al. 2011). Basierend auf einer empirischen Analyse des Handlungsfelds erfolgte mittels der ausgewerteten Daten ein Designprozess zur Entwicklung einer technischen Lösung, die den Anwender in seiner täglichen Arbeit adäquat unterstützen soll. Es wurde ein ethnographischer Ansatz gewählt, um die Praktiken und den sozialen Kontext

der Maschineneinrichter zu verstehen (Randall et al. 2007). Spezifische Inhalte zur Konzipierung des Unterstützungssystems sind u.a. in der Ausarbeitung von De Carvalho et al. (2018) zu finden.

Um die gewonnenen qualitativen Erkenntnisse verifizieren oder falsifizieren und schließlich erweitern zu können, wurden Teilstudien durchgeführt, die auch quantitative Komponenten umfassten. Das "Sequential Exploratory Design" (Creswell et al. 2007) basiert als Mixed-Methods-Ansatz auf der Analyse von hauptsächlich qualitativen, aber auch quantitativen Daten, die sequentiell gesammelt, priorisiert und in eine oder mehrere Phasen des Forschungsprozesses integriert werden.

Ein erstes Teilforschungsvorhaben enthielt eine ergonomische Studie zur Untersuchung möglicher Belastungen und Beanspruchungen infolge des Umgangs mit einem HMD während einfacher Montagetätigkeiten und statischer Blickpositionierungen (Abele 2019). Um auch dynamische und realitätsnahe Bewegungsabläufe zu evaluieren, bestand in einer darauf aufbauenden Studie die Aufgabe in der mechanischen Einrichtung einer Rotationszugbiegemaschine. Das Versuchsdesign umfasste drei Rüstvorgänge, die in zwei Versuchsabschnitten erfolgten. Untersuchungsgegenstand war, wie in der Vorstudie, die Microsoft HoloLens. Vier der insgesamt sechs Durchgänge wurden von 24 männlichen Probanden (Durchschnittsalter 26,2 Jahre) mit und zwei Durchgänge ohne HoloLens, d.h. unter Verwendung einer Papierinstruktion, durchlaufen. Neben der objektiven Erfassung der Montagezeit und etwaiger Prozessfehler wurden mithilfe der OEMG sowie anhand von Wärmebildern die physiologischen Beanspruchungen evaluiert. Die muskuläre Aktivität des Schulter-Nacken-Bereichs wurde anhand des M. sternocleidomastoideus und des M. trapezius pars descendens, der im Nacken und an der Schulter abgegriffen wurde, untersucht. Standardisierte Fragebögen zur physiologischen und mentalen Empfindung – NASA Task Load Index (NASA-TLX), Visual Fatigue Questionnaire (VFQ) und Rating Scale of Mental Effort (RSME) – sowie ein teilstrukturiertes Interview erfassten neben den subjektiven Empfindungen auch die Vorerfahrungen mit dem Prozess und vergleichbaren technischen Geräten, die Technikaffinität sowie das Feedback der Probanden zum Umgang mit der Datenbrille.

4. Ergebnisse

Die hier veröffentlichten Teilergebnisse aus der Gesamtuntersuchung zeigen zum Teil eine Diskrepanz zwischen objektiven und subjektiven Daten. Während die Daten zur Komfortbeeinträchtigung im Kopfbereich übereinstimmen, empfinden die Probanden zwar eine erhöhte muskuläre sowie kognitive Beanspruchung bei Nutzung der HoloLens. Abbildung 1 ist jedoch zu entnehmen, dass die objektive Muskelaktivierung des M. trapezius pars descendens und des M. sternocleidomastoideus bei Anwendung des HMD mit nur einer Ausnahme geringer als bei der Durchführung ohne Datenbrille ist. Lediglich der untere rechte Teil des M. trapezius pars descendens zeigt eine erhöhte Muskelbeanspruchung. Weiterhin steigen die Muskelaktivitäten mit der Versuchsdauer an. Die subjektive Einschätzung der Probanden bezüglich der Muskelbeanspruchung, die im Widerspruch zu den objektiven Ergebnissen steht, wurde insbesondere durch die im Bereich der Nase und der Stirn sichtbar entstandenen Wärme- bzw. Druckstellen bestätigt.

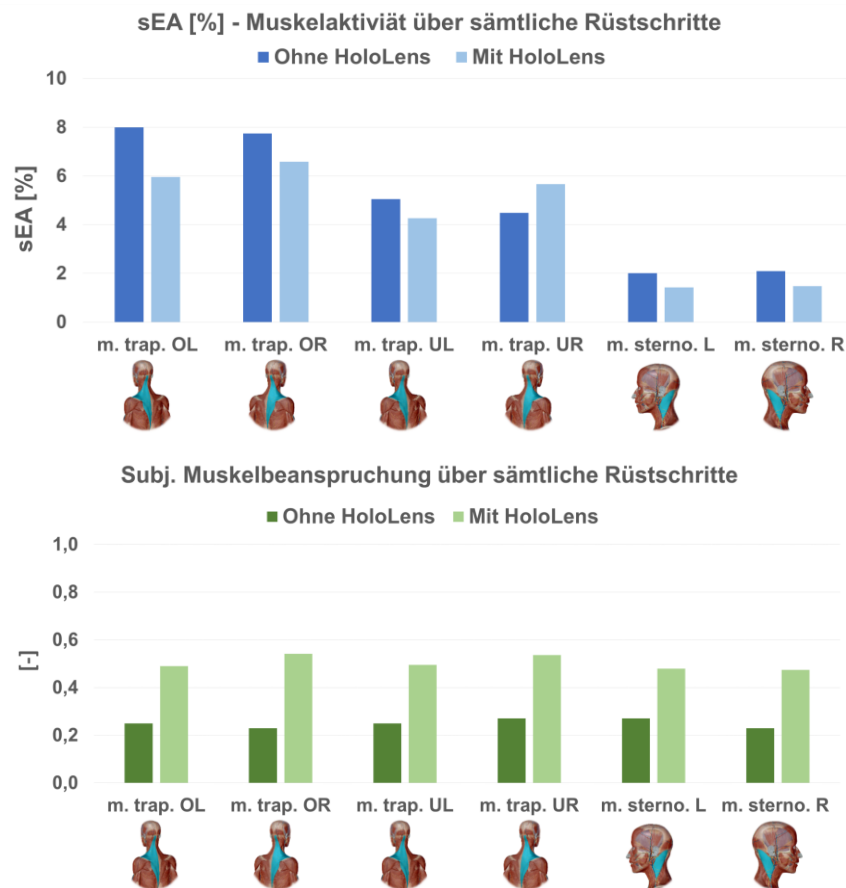


Abbildung 1: Visuelle Darstellung der standardisierten Elektromyographischen Aktivität [%] (oben) sowie die subjektive Empfindung der einzelnen Muskelstellen (unten) über alle Rüstvorgänge zum Vergleich der Anwendung ohne und mit Nutzung der HoloLens

Die Ergebnisanalyse zeigt weiterhin, dass, gemessen am RSME, die HoloLens-Nutzung die kognitive Belastung des Anwenders ($M=30,53$, $SD=17,26$) im Vergleich zur Anwendung ohne HoloLens ($M=27,33$; $SD=17,83$) erhöht ($t(24)=-2,432$; $p<.05$). Zudem weisen die Probanden im zweiten Versuchsabschnitt eine geringere kognitive Belastung bei gleichzeitiger Reduktion der Fehler und der Rüstzeit auf. Während im ersten Versuchsdurchgang noch knapp sechs Fehler pro Proband ($MW= 5,96$, $SD=3,17$) verursacht wurden, ist die Fehlerzahl im zweiten Versuchsdurchgang deutlich geringer ($MW= 1,29$, $SD=1,76$, $t(24)=8,91$, $p<.01$). Darüber hinaus zeigt sich durch den VFQ, dass das Tragen der HoloLens einen statistisch signifikanten Einfluss auf die visuelle Ermüdung ausübt ($t(24)=-5,09$, $p<.01$).

5. Diskussion

Das mit rund 580 Gramm hohe Eigengewicht sowie die ungünstige, gesichtsseitige Gewichtsverteilung der HoloLens sind ihre stärksten ergonomischen Limitierungen. Diese Limitierungen bedingen beim Anwender Druckstellen im Kopfbereich, die zu Durchblutungsstörungen und schließlich zu Schmerzen führen. Die Materialbeschaffenheit und die notwendige Verlagerung des Sitzes der HoloLens für Brillenträger verstärken die entstehende Druckspannung.

Abele (2019) hat gezeigt, dass bei statischen Blickpositionierungen und unkomfortablen Positionierungen der Hologramme eine signifikant höhere Muskelaktivität im

Vergleich zu einer papierbasierten bzw. analogen Darstellung der entsprechenden Informationen resultiert. Bei dynamischen Tätigkeiten, wie dem Rüstvorgang einer Biegemaschine, erübrigt sich dieser Effekt. Hierbei kommt es durch die natürlichen Bewegungen des Probanden zu einer ständigen Kontraktion und Relaxation der Muskeln, die dadurch weniger beansprucht werden als bei einer rein statischen Muskelbelastung (Schlick et al. 2018). Die Ortsgebundenheit der Papierinstruktion führt aber dazu, dass der Proband einer Mehrbeanspruchung durch das Ergreifen der Instruktion ausgesetzt ist. Die Hologramme der HoloLens folgen dagegen dem Sichtfeld des Nutzers, sodass eine räumliche Überlagerung der Instruktionen mit dem operativen Tätigkeitsfeld des Probanden resultiert. Die Folge sind verminderte Kopfbewegungen und Auslenkungen des Oberkörpers, was durch die verminderte Aktivierung des Trapezius- und des Sternocleidomastoideus-Muskels nachweisbar wird. Einzig der untere rechte Teil des M. trapezius pars descendens wird bei Anwendung des HMD stärker beansprucht. Dieser Sachverhalt ist durch die Notwendigkeit der Interaktion mit der HoloLens in Form des sogenannten „AirTap“ begründet, wobei der Proband den rechten Arm cranial-ventral auf Gesichtshöhe auslenkt. Der subjektiv empfundene muskuläre Mehraufwand bei Anwendung der HoloLens, der im Gegensatz zu den objektiven Daten steht, resultiert aus der vermeintlichen Schlussfolgerung der Probanden, dass mit den Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich ein höherer muskulärer Aufwand im Schulter-Nacken-Bereich einhergeht. Insgesamt ist anzumerken, dass sowohl die objektiven als auch die subjektiven Beanspruchungsdaten im Zuge des Rüstvorgangs ein moderates Maß nicht überschreiten. Außerdem sind die Unterschiede der OEMG-Daten mit und ohne Nutzung der HoloLens minimal. Die Interpretierbarkeit der objektiven Ergebnisse ist bei einem gleichzeitig vorherrschenden sehr geringen Beanspruchungsgrad damit nur begrenzt möglich. Demnach sind Ermüdungserscheinungen einzig bei repetitiver Ausführung ohne Einhaltung von Pausen wahrscheinlich.

Die Probanden erfahren zudem eine erhöhte kognitive Beanspruchung, wenn die Inhalte der Arbeitsanleitung nicht ihrem prozessrelevanten Erfahrungs- bzw. Wissensstand entsprechen. Insbesondere zu Versuchsbeginn ist die mentale Beanspruchung hoch, v.a. durch die Neuartigkeit der Aufgabe im Hinblick auf den Rüstprozess selber oder die Interaktionsanforderungen der HoloLens sowie die Vielzahl relevanter Informationen. Somit ist eine größere Konzentration und Aufmerksamkeit seitens der Probanden erforderlich. Aufgrund der intuitiven Bedienung sowie der intensiven und konzentrierten Auseinandersetzung mit dem Unterstützungssystem, setzt ein Lerneffekt sowohl hinsichtlich des Rüstprozesses als auch in Bezug auf den Umgang mit der Datenbrille und der Applikation schneller ein. Zudem gehen diese Aspekte mit einer Fehlerreduktion einher. Somit eignen sich die Probanden durch die HoloLens-Anleitung zügiger Wissen und Erfahrung an. Für die Praxis nimmt dieser Zusammenhang eine wichtige Rolle ein, da das System unerfahrene bzw. anzulernende Maschineneinrichter zugunsten eines prozesssicheren und fehlerminimalen Rüstvorgangs unterstützt.

Um jegliche dieser AR-Systeme im industriellen Umfeld auf der einen Seite wertschöpfend und andererseits beanspruchungsminimal einsetzen zu können, sind weitere konstruktive und technologische Überarbeitungen, wie bspw. eine Optimierung der Gewichtsverteilung oder die Vergrößerung des Sichtfelds, unabdingbar. Diesen Aspekten muss bei der (Weiter-)Entwicklung von HMDs grundsätzlich nachgegangen werden. Inwieweit diese dann im Praxisalltag aus ergonomischer und ökonomischer Sicht tatsächlich praktikabel sind, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

6. Literatur

- Abele ND, Hoffmann S, Kuhnhen C, Ludwig T, Schäfer W, Schweitzer M, Wulf V (2016) Supporting the Set-up Processes by Cyber Elements based on the Example of Tube Bending. In: Mayr HC & Pinzger M (Ed), Informatik 2016 – Informatik von Menschen für Menschen, GI-Edition-Lecture Notes in Informatics (LNI), 1627-1637.
- Abele ND (2019) Cyber-physische Rüstunterstützung – Ergonomische Untersuchung zur Evaluierung physischer und kognitiver Beanspruchung des Menschen bei der Nutzung eines Head-Mounted Display (HMD). In: Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten. Proceedings des 65. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Beitrag D.1.1, GfA-Press, Dortmund.
- Bhattacharya B, Winer EH (2019) Augmented reality via expert demonstration authoring (AREDA). *Computers in Industry* 105: 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.021>.
- Creswell JW, Clark VLP, Gutmann M, Hanson WE (2007) An Expanded Typology for Classifying Mixed Methods Research Into Designs Editors' Introduction. *Handbook of mixed methods in social and behavioral research*: 209–240.
- De Carvalho AFP, Hoffmann S, Abele ND, Schweitzer M, Tolmie P, Randall D, Wulf V (2018) Of Embodied Action and Sensors. *Knowledge and Expertise Sharing in Industrial Set-Up. Computer Supported Cooperative Work* 27 (3-6): 875-916.
- Janssen S, Möller K (2011) Erfolgreiche Steuerung von Innovationsprozessen und -projekten – Ergebnisse einer empirischen Studie. *Zeitschrift für Controlling & Management* 55, 2: 97–104.
- Microsoft (2018) Windows Mixed Reality. Gestures. Accessed March, 2018. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures>.
- Miina A (2012) Lean Problem: Why Companies Fail with Lean Implementation? *Management* 2, 5: 232–250. <https://doi.org/10.5923/j.mm.20120205.12>.
- Paelke V, Röcker C (2015) User Interfaces for Cyber-Physical System: Challenges and Possible Approaches. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20886-2>.
- Palanisamy S, Siddiqui S (2007) Changeover Time Reduction and Productivity Improvement by Integrating Conventional SMED Method with Implementation of MES for Better Production Planning and Control. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO Certified Organization)* 3297, 12. Retrieved February 9, 2017 from www.ijirset.com.
- Randall D, Harper R, Rouncefield M (2007) *Fieldwork for Design: Theory and Practice*. Springer, London.
- Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) Arbeitsformen. In: Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) *Arbeitswissenschaft*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2_3.
- Shingo S (1985) *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. CRC Press.
- Steinhilber B, Anders C, Jäger M, Läubli T, Luttmann A, Rieger MA, Scholle HC, Schumann NP, Seibt R, Strasser H, Kluth K (2013) S2k-Leitlinie zur Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 67:113-128.
- Tang A, Owen C, Biocca F, Mou W (2003) Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. *Proceedings of the conference on Human factors in computing systems - CHI '03*, 5: 73.
- Tergan SO, Keller T (2005) *Knowledge and Information Visualization: Searching Synergies*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Theis S, Pfendler C, Alexander T, Mertens A, Brandl C, Schlick CM (2016) Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Wille M (2016) Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Wulf V, Rohde M, Pipek V, Stevens G (2011) Engaging with practices: Design case studies as a research framework in CSCW. *Proceedings of CSCW '11*, 505-512.

Danksagung: Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“, gefördert durch EFRE-0800263





Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

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,
- 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.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de