

Subjektives Beanspruchungserleben während der Nutzung eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems im Zuge industrieller Rüstvorgänge

Nils Darwin ABELE, Karsten KLUTH

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

Kurzfassung: Die vorliegende Ausarbeitung stellt die Evaluierung eines auf Augmented Reality (AR) basierenden Cyber-Physischen Produktionssystems (CPPS) für industrielle Rüstprozesse hinsichtlich ausgewählter subjektiver Beanspruchungsparameter vor. Einem durch die Nutzung des Unterstützungssystems erhöhten kognitiven bzw. psychologischen Mehraufwands stehen eine verbesserte Leistungsfähigkeit bzw. geringere Fehleranfälligkeit der Nutzer gegenüber. Die Ergebnisse zeigen existierende Barrieren und Potentiale hinsichtlich einer prozesssicheren und ergonomischen Implementierung und Nutzung eines AR-basierten Tools im industriellen Kontext auf.

Schlüsselwörter: Augmented Reality, Head-Mounted Display, Cyber-Physische Produktionssysteme, Human-Computer Interaction, Industrielle Rüstprozesse, Subjektives Beanspruchungserleben

1. Einleitung

Der zunehmende Bedarf an individuellen Produkthanforderungen zwingt Unternehmen zur Produktion kleiner Losgrößen. Insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen steigt dadurch die Frequenz manueller Rüstvorgänge. Mitunter können diese Prozesse eine hohe Komplexität aufweisen (Janssen & Möller 2011). Um in diesem Zusammenhang die Prozessqualität zu gewährleisten, können u.a. digitale Lösungen zur Unterstützung der Maschineneinrichter eingesetzt werden. Augmented Reality (AR) kann zu einer schnellen, einfachen und ortsbezogenen Aufbereitung rüstspezifischer Informationen verhelfen. Die Entwicklung von Head-Mounted Displays (HMD) schreitet rasant voran. Mit den zunehmenden technischen Möglichkeiten steigen jedoch auch die Anforderungen an eine konstruktiv ausgereifte bzw. ergonomische Gestaltung sowie die Akzeptanz praxisnaher Nutzer. Die Forschungsarbeiten sind hinsichtlich der Anwendung AR-basierter Tools in der Praxis jedoch nicht vollendet (Bhattacharya & Winer 2019).

Das Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0“ (Abele et al. 2016) zielte auf die Entwicklung einer prototypischen digitalen Applikation für industrielle Rüst- bzw. Einrichtvorgänge an Biegenmaschinen zur Unterstützung von Maschineneinrichter ab. Die Anwendung wurde für die Mixed-Reality-Datenbrille „HoloLens“ von Microsoft realisiert. Mithilfe des sogenannten „Expert to Go“ können prozessrelevante Informationen über Hologramme kontextspezifisch in das reale Sichtfeld des Nutzers projiziert werden. Mehrere experimentelle Studien wurden zur Untersuchung möglicher physischer und psychischer bzw. kognitiver Einflussfaktoren durch die Nutzung eines derartigen Unterstützungssystems durchgeführt.

2. Stand der Technik

Die Lean-Philosophie ist seit jeher auf die kontinuierliche Suche nach Verbesserungen und die Eliminierung von Verschwendungen ausgerichtet. Sie soll Unternehmen zur Optimierung ihrer Wettbewerbsfähigkeit verhelfen (Miina 2012). Der Ansatz „Single Minute Exchange of Die“ (SMED) unterteilt den Werkzeugwechsel in interne und externe Rüstvorgänge. Er zielt durch organisatorische und technische Maßnahmen auf die Minimierung der Rüstzeit in mehreren iterativen Schritten auf bis zur Hälfte der ursprünglich benötigten Zeit ab. Weiterhin soll die Praktik nach Shingo (1985) auch zur Qualifikation bzw. zum Wissenserwerb des Maschineneinrichters beitragen. Die Human-Computer Interaction (HCI) greift diesen Gedanken hinsichtlich der Gestaltung digitaler Visualisierungstechnologien für den Wissenstransfer auf (Tergan & Keller 2005). Um wissensintensive Prozesse beherrschen und effiziente Arbeitspraktiken ermöglichen zu können, wurden Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) bzw. das Industrial Internet of Things (IIoT) entwickelt (Paelke & Röcker 2015). Die HoloLens stellt eine derartige AR-gestützte CPPS- bzw. IIoT-Technologie dar. Mit den über das HMD visualisierten dreidimensionalen Hologrammen kann mithilfe einer Sprach- und Gestensteuerung interagiert werden (vgl. Microsoft 2018).

Tang et al. (2003) weisen darauf hin, dass mehrere Studien AR-gestützte Lernprozesse in industriellen Arbeitsumgebungen untersuchten. Die Ergebnisse zeigen, dass aus dem Einsatz von AR ein geringerer Interaktionsaufwand, eine verbesserte Task-Performance sowie eine Abnahme des Cognitive Load resultieren.

Demgegenüber wurden in weiteren Studien, die sich auf die Nutzung eines AR-basierten HMDs beziehen, allerdings erhöhte physiologische Beanspruchungen im Schulter-Nacken-Bereich des Anwenders (Theis et al. 2016; Cometti et al. 2018; Abele & Kluth 2020; Friemert et al. 2020) sowie psychologische bzw. kognitive Beanspruchungen festgestellt (Lewis & Neider 2016; Wille et al. 2016; Tegtmeyer & Wischniewski 2018; Abele & Kluth 2020).

Im Zuge dessen besteht nach wie vor speziell hinsichtlich industrieller Montage- und Rüsttätigkeiten sowie binokularer und gestengesteuerter AR-Anwendungen ein essentieller Bedarf an ergonomischen Untersuchungen, die sowohl auf quantitativen als auch auf qualitativen Daten basieren.

Die vorliegende Ausarbeitung stellt Ergebnisse einer Folgestudie vor, die auf Grundlage von Abele (2019) entstanden ist und die beschriebenen Aspekte aufgreift. Die hier dargestellten Ausführungen ergänzen die von Abele & Kluth (2020) präsentierten Ergebnisse um das subjektive Beanspruchungserleben während der Nutzung eines AR-basierten Cyber-Physischen Produktionssystems im Zuge industrieller Rüstvorgänge.

3. Methode und Versuchsdesign

Spezifische Inhalte und Methoden von „Cyberrüsten 4.0“ sind aus Gründen der Redundanz den Ausführungen von Abele et al. (2016), De Carvalho et al. (2018) und Abele & Kluth (2020) zu entnehmen, die den auf Grundlage einer Designfallstudie durchgeführten nutzerzentrierten Ansatz zur Entwicklung eines entsprechenden IIoT-Tools beschreiben.

Dem Forschungsprojekt entstammen zur Verifizierung bzw. Falsifizierung der gewonnenen Erkenntnisse u.a. ergonomische Studien zur Evaluierung physiologischer und psychologischer Beanspruchungen durch die Anwendung eines HMDs. Während

Abele (2019) einfache Montagetätigkeiten und statische Blickpositionierungen untersuchte, wurde von Abele & Kluth (2020) die realitätsnahe Einrichtung einer Rotationszugbiegemaschine evaluiert. Die hier beschriebenen Teilergebnisse beziehen sich auf letztere Studie.

Vier von insgesamt sechs Rüstvorgängen wurden mit dem Untersuchungsgegenstand „Microsoft HoloLens“ in Form der Rüstapplikation „Expert to Go“ durchgeführt, welche die Montageanleitungen visualisierte. Die zwei verbleibenden Rüstvorgänge erfolgten anhand einer örtlich gebundenen Papierinstruktion ohne Nutzung der HoloLens. Die objektiven Messdaten der insgesamt 24 männlichen Probanden (Durchschnittsalter 26,2 Jahre) umfassten elektromyographische Aktivitäten des Schulter-Nacken-Bereichs (m. trapezius pars descendens und m. sternocleidomastoideus), thermografische Aufnahmen des Kopfbereichs, die Montagezeit sowie Prozessfehler (vgl. Abele & Kluth 2020).

Das subjektive Beanspruchungserleben wurde sowohl durch standardisierte Befragungen, d.h. Fragebögen zur physiologischen Empfindung, den NASA Task Load Index (NASA-TLX), den Visual Fatigue Questionnaire (VFQ) und den Rating Scale of Mental Effort (RSME) als auch durch ein qualitatives bzw. teilstrukturiertes Interview durchgeführt. Darüber hinaus wurden Vorerfahrungen mit dem Prozess und vergleichbaren technischen Geräten, die Technikaffinität sowie das persönliche Feedback der Probanden zum Umgang mit der Datenbrille erfragt – u.a. in Bezug auf die Usability bzw. optimalen Bedienbarkeit des interaktiven Tools durch den Questionnaire of User Satisfaction (QUIS) und den AttrakDiff.

Die quantitativen Daten wurden sowohl deskriptiv als auch inferenzstatistisch ausgewertet. Mithilfe der „Intelligent Verbatim“-Methode konnten sämtliche Interviews transkribiert und schließlich kodiert und analysiert werden.

Aus Gründen der Darstellbarkeit werden in dieser Ausarbeitung Teilergebnisse nicht vollumfänglich präsentiert.

4. Ergebnisse

Während die subjektiv empfundene muskuläre Beanspruchung des Schulter-Nacken-Bereichs ein moderates Maß nicht überschritt, wurden durch die Probanden bei Anwendung der HoloLens insbesondere im Bereich der Nase und der Stirn stärkere Wärme- und Druckstellen lokalisiert, die allerdings ebenfalls als lediglich „moderat“ eingestuft wurden (Abbildung 1; Abbildung 2).

Diese Erkenntnisse wurden auch durch qualitative Aussagen der Probanden gestützt. Versuchsperson Nr. 8 merkte an: *„Insgesamt ist die HoloLens etwas zu schwer. Dadurch bekommt man schnell Druckstellen an der Nase und an der Stirn.“*

Die Analyse des RSME zeigte, dass die Anwendung des HMD ($M=30,53$, $SD=17,26$) eine im Vergleich zur Durchführung ohne Unterstützungssystem ($M=27,33$; $SD=17,83$) signifikant höhere kognitive Beanspruchung hervorruft ($t(24)=-2,43$; $p<.05$). Die kognitive Beanspruchung nimmt jedoch zusammen mit der Fehleranzahl und der Rüstzeit mit fortschreitender Versuchsdauer ab ($z=-2.95$, $p<.01$, $n=24$). Auch diese Ergebnisse wurden durch die Probanden im Rahmen der Interviews bestätigt, wie Proband Nr. 10 verdeutlichte:

„Nach einer gewissen Eingewöhnung kam ich ganz gut mit der Brille [HoloLens, Anm.] zurecht. Man muss sich aber schon konzentrieren, um alles richtig zu machen.“

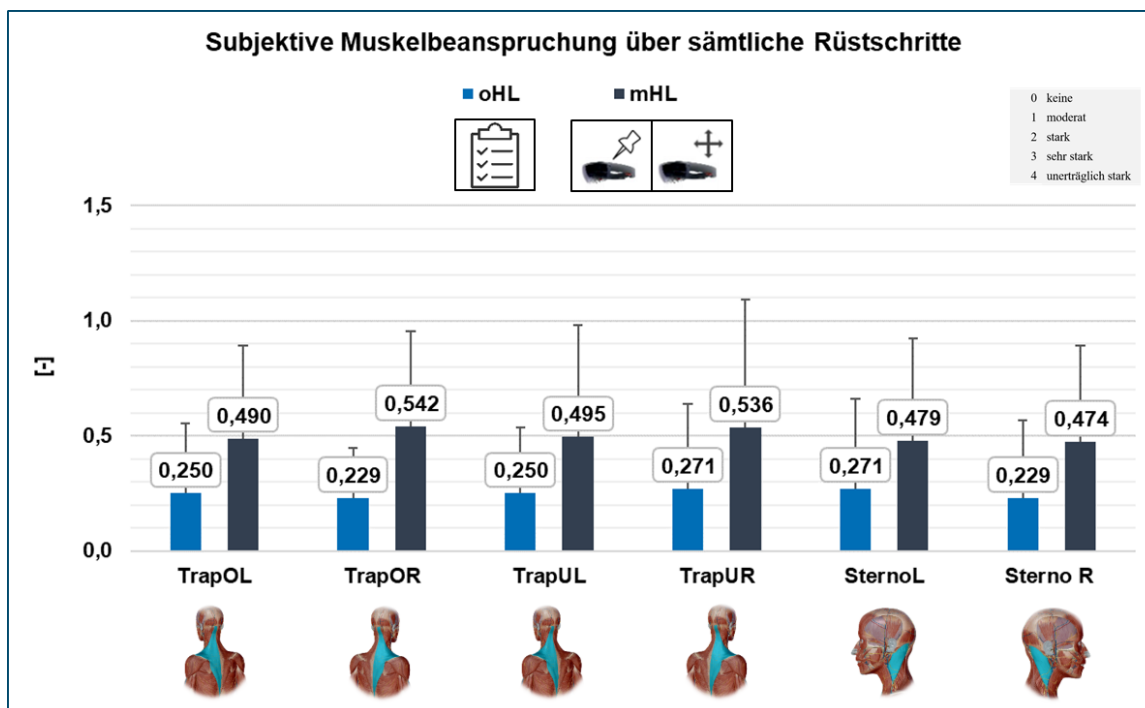


Abbildung 1: Mittelwerte und Standardabweichungen (n=24) des m. trapezius pars descendens (TrapOL/OR, Trap UL/UR) und m. sternocleidomastoideus (Sterno L/R), über sämtliche Rüstvorgänge im Vergleich der Durchführung ohne (oHL) und mit HoLoLens (mHL).







Kopfstellen	t-Wert, Signifikanzniveau, Effektstärke	Mittelwert	Standardabweichung
 Stirn	$t(24) = 6.935, p < .001, d = 1.416$	$M_{mHL} = 1.037$ $M_{oHL} = 0.281$	$SD = 0.519$ $SD = 0.385$
 Nase	$t(24) = 8.684, p < .001, d = 1.773$	$M_{mHL} = 0.901$ $M_{oHL} = 0.135$	$SD = 0.481$ $SD = 0.255$
 Hinterkopf	$t(24) = 5.675, p < .001, d = 1.158$	$M_{mHL} = 0.563$ $M_{oHL} = 0.125$	$SD = 0.328$ $SD = 0.276$
 linksseitige Schläfe	$t(24) = 5.560, p < .001, d = 1.105$	$M_{mHL} = 0.688$ $M_{oHL} = 0.156$	$SD = 0.388$ $SD = 0.264$
 rechtsseitige Schläfe	$t(24) = 5.802, p < .001, d = 1.184$	$M_{mHL} = 0.688$ $M_{oHL} = 0.135$	$SD = 0.388$ $SD = 0.255$
 (Ober-)Kopf	$t(24) = 3.165, p = .002, d = 0.646$	$M_{mHL} = 0.281$ $M_{oHL} = 0.094$	$SD = 0.326$ $SD = 0.192$

Abbildung 2: Statistische Daten zur Druck- und Wärmeempfindung sechs unterschiedlicher Kopfbereiche der 24 Probanden, d.h. Stirn, Nase, Hinterkopf, links- und rechtsseitige Schläfe sowie (Ober-)Kopf.

Darüber hinaus zeigte sich durch den VFQ, dass das Tragen der HoLoLens einen statistisch signifikanten Einfluss auf die visuelle Ermüdung ausübt ($t(24) = -5,09, p < .01$). Die Probanden weisen eine im Vergleich zur Anwendung mit Datenbrille ($M = 7,47, SD = 5,52$) geringere visuelle Ermüdung ohne HoLoLens ($M = 4,41, SD = 5,08$) auf.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Häufigkeit der Nutzung von digitalen Endgeräten nicht signifikant mit der kognitiven Beanspruchung korreliert ($r = .059, p > .05, n = 24$).

Die Auswertung des mehrdimensionalen NASA-TLX-Fragebogens, der zur Messung der erlebten mentalen, physiologischen und zeitlichen Beanspruchung sowie der Leistung, Anstrengung und Frustration einer Person bei einer bestimmten Tätigkeit eingesetzt wird, legte dar, dass die Gesamtbeanspruchung der Probanden bei der Anwendung mit Datenbrille ($M=35,39$, $SD=9,70$) im Vergleich zur Nutzung ohne Unterstützungssystem ($M=32,85$, $SD=11,24$) geringfügig höher war. Dieser Umstand basiert insbesondere auf einer durch zusätzlich zur Arbeitsaufgabe erforderlichen Interaktion mit dem HMD, welche die geistige Anforderung verstärkt ($M_{oHL}=19,58$, $SD_{oHL}=13,94$; $M_{mHL}=22,03$, $SD_{mHL}=14,66$). Demgegenüber steht jedoch eine erhöhte Leistungsfähigkeit ($M_{oHL}=69,90$, $SD_{oHL}=27,25$; $M_{mHL}=77,03$, $SD_{mHL}=19,32$), die mithilfe der Unterstützungssystematik realisiert und durch eine reduzierte Fehlerquote objektiv nachgewiesen werden konnte (Abele 2020).

5. Diskussion

Die Komfortbeeinträchtigungen im Kopfbereich wurden im Vergleich zum muskulären Beanspruchungserleben bei der Nutzung der HoloLens stärker wahrgenommen. Dieser Sachverhalt ist durch das mit rund 580 Gramm hohe Eigengewicht sowie die ungünstige, gesichtsseitige Gewichtsverteilung der HoloLens begründet. Insgesamt überschreiten die angegebenen Werte ein moderates Maß nicht wesentlich, sodass Ermüdungserscheinungen einzig bei einer repetitiven Interaktion mit dem Unterstützungssystem, bspw. durch den sogenannten „AirTap“, ohne Einhaltung von Pausen wahrscheinlich sind.

Sofern die Inhalte der Instruktionen nicht dem prozessrelevanten Erfahrungs- bzw. Wissensstand der Versuchspersonen entsprechen, erfahren sie eine erhöhte kognitive Beanspruchung. Durch die Neuartigkeit der Aufgabe hinsichtlich der Interaktionsanforderungen sowie des Rüstvorgangs inklusive der dazugehörigen Informationen war der mentale Mehraufwand insbesondere zu Versuchsbeginn höher als zum Ende des Versuchs. Eine anfangs verstärkte Konzentrations- und Aufmerksamkeitsanforderung gepaart mit einer intuitiven Bedienbarkeit führte jedoch dazu, dass bei den Probanden ein Lern- und Gewöhnungseffekt in Bezug auf den Rüstprozess sowie den Umgang mit der HoloLens und der Applikation schnell einsetzte. Mithilfe der AR-Anleitung stieg im Vergleich zur Durchführung ohne Datenbrille die Leistungsfähigkeit der Versuchspersonen zugunsten weniger Montagefehler. Mit Ausnahme der von Tang et al. (2003) festgestellten Abnahme des Cognitive Load konnten somit im Vergleich zu bisherigen Studien übereinstimmende Erkenntnisse festgestellt werden. Für die Unterstützung unerfahrener respektive anzulernender Maschineneinrichter sind die beschriebenen Aspekte von enormem Vorteil, um prozesssichere und fehlerminimale Rüstvorgänge generieren zu können.

Bei der rasant fortschreitenden (Weiter-)Entwicklung von HMDs sind konstruktive und technologische Änderungen stetig kritisch zu hinterfragen und kontinuierliche Optimierungen anzustreben. Eine ergonomische Gestaltung des Unterstützungssystems ist in diesem Zusammenhang ebenso wichtig wie eine nutzerzentrierte, intuitive und beanspruchungsminimale Interaktion mit dem AR-Tool.

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 (2016), 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.
- Abele ND, Kluth K (2020) Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen. In: Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Beitrag B.2.1, 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>.
- Cometti C, Paizis C, Casteleira A, Pons G, Babault N (2018) Effects of mixed reality head-mounted glasses during 90 minutes of mental and manual tasks on cognitive and physiological functions. PeerJ. 6:e5847. doi: 10.7717/peerj.5847.
- 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.
- Friemert D, Terschüren C, Groß B, Herold R, Leuthner N, Braun C, Hartmann U, Harth V (2020) What Is the State of Smart Glass Research from an OSH Viewpoint? A Literature Review. In: Duffy V. (2020) Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Human Communication, Organization and Work. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12199. Springer, Cham. http://doi-org-443.webvpn.fjmu.edu.cn/10.1007/978-3-030-49907-5_25
- Janssen S, Möller K (2011) Erfolgreiche Steuerung von Innovationsprozessen und -projekten – Ergebnisse einer empirischen Studie. Zeitschrift für Controlling & Management 55, 2: 97-104.
- Lewis J, Neider M (2016) Through the Google Glass: the impact of heads-up-display on visual attention. Cogn. Res.: Princ. Implic. 1(13), 1-13.
- 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>.
- Shingo S (1985) A Revolution in Manufacturing: The SMED System. CRC Press.
- 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.
- Tegtmeier P, Wischniewski S (2018) Tablets and smart glasses in modern production environments – a lab study on distracted walking. In: Karwowski, W., Ahram, T. (2018) ISHI 2018. AISC, vol. 722, Springer, Cham., 614-619.
- 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.

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





Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit HUMAINE gestalten

67. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie (WiPs)
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Ruhr-Universität Bochum

3. - 5. März 2021

GfA-Press

Bericht zum 67. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 3. - 5. März 2021

**Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie, Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2021
ISBN 978-3-936804-29-4

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

© 2021 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de