

# **Analyse der Hand-Arm-Haltungen, Haltezeiten und physiologischen Beanspruchungen bei statischer Überkopfarbeit mit und ohne passivem Exoskelett**

Jurij WAKULA, Verena KLAER, Tim STEINEBACH

*Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt  
Otto-Berndt-Straße 2, D-64367 Darmstadt*

**Kurzfassung:** Im Rahmen einer Laborstudie am IAD der TU Darmstadt wurden muskuläre Beanspruchungen bei verschiedenen definierten statischen Überkopf-Armhaltungen nach Bier (1991) mit und ohne passives Exoskelett analysiert. EA-Aktivitäten wurden mit der OEMG-Methode in vier Muskeln des Hand-Arm-Schulterbereichs sowie in einem Muskel im Rücken gemessen. 23 junge Versuchspersonen (16 männlich und 7 weiblich) nahmen an der Studie teil. Es wurde geprüft, inwiefern sich die lokale Beanspruchung bei der Nutzung von passiven Exoskeletten bei der statischen Überkopfarbeit in ausgewählten Positionen des Greifraums (D1, D3, D4, A5) ändert. Die gewonnenen Ergebnisse der Studie werden später zu einer Anpassung der Ermittlung von Erholzeiten nach Bier (1991) verwendet.

**Schlüsselwörter:** statische Überkopfarbeit, Greifraum, passive Exoskelette, EMG-Analyse

## **1. Einleitung**

Derzeit erscheinen immer mehr passive und aktive Exoskelette für industrielle Anwendungen auf dem Markt (z.B. Voilqu'ée et al. 2019).

Der Einsatz von solchen Exoskeletten ist motiviert durch die Reduzierung der menschlichen lokalen und gesamten Beanspruchung, hervorgerufen durch ergonomisch belastende Körperhaltungen (z.B. statische Hand-Arm-Haltungen sowie Überkopfarbeit) oder durch manuelle Lastenhandhabung.

Ob und in welchem Umfang eine Belastungs- und Beanspruchungsreduzierung durch den Einsatz von passiven Exoskeletten an industriellen Arbeitsplätzen erfolgt, wird derzeit intensiv geforscht. Einige Ergebnisse aus biomechanischen und arbeitsphysiologischen Studien mit passiven Exoskeletten liegen vor (z.B. Hensel und Keil 2018, de Loose et al. 2016, Spada et al. 2018, Wakula et al. 2019). Leider fehlen derzeit evaluierte Analysekonzepte sowie Ergebnisse vor allem aus Langzeitstudien. Aufbauend auf den Literaturerkenntnissen (siehe u.a. Tabelle 1) wurde am IAD ein Konzept zur Analyse und Bewertung der biomechanischen Belastungen und arbeitsphysiologischen Beanspruchungen beim Einsatz von passiven Exoskeletten für Überkopfarbeit im Labor und in der Praxis erarbeitet (Wakula et al. 2019). In einem ersten Schritt der Evaluierung des Konzepts wurden zwei Laborstudien konzipiert. Ergebnisse der ersten Studie sind bereits publiziert worden (Wakula et al. 2019). In dieser zweiten Laborstudie sollte die Frage geklärt werden, ob und in welchem Umfang eine Belastungs- und Beanspruchungsreduzierung durch den Einsatz von ausgewählten passiven Exoskeletten bei der Überkopfarbeit mit definierten Positionen (nach Bier 1991) in den oberen Extremitäten und im Rücken erfolgt.

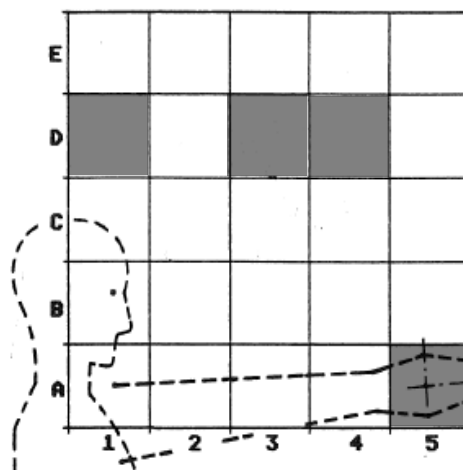
**Tabelle 1:** Zusammenfassung der empirischen Studien zu passiven Exoskeletten bei Überkopfarbeit

Autoren, Jahr	Verwendetes Exoskelett	Aufgabe	Untersuchungsgrößen /-variablen
Hensel und Keil, 2018	Levitate-Airframe; Paexo-Ottobock	Montagearbeitsplatz der Unterbodenverkleidung	Gebrauchstauglichkeit, Diskomfort, Nutzungsintention, Befragung, wahrgenom. Entlastung
Butler und Wisner, 2017	Levitate- Airframe	Dynamische Aufgabe – Lackieren, statische Aufgabe - Schweißen	Produktivität und Qualität mit einem Simulator
Spada et al., 2017	Levitate-Airframe	Statische, dynamisch, Präzisionsaufgabe	Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz, Interviews & Bewert.
Rashedi et al., 2014	Tragbares Hilfsgerät (WADE)	Statische Aufgabe	wahrgenommene Diskomfort, EMG, Teilnehmerfeedback
Moyon et al., 2018	Prototyp von Skel-Ex	Veredelungsarbeit an einem Boot	„Cardiac cost“ Analyse mit Messung der Herzfrequenz
Wakula et al., 2019	Levitate Skel-Ex	Statische, dynamische, Präzisionsaufg.	Laborstudie, EMG-Hand-Arm-Schulter & Rücken

## 2. Methodik, Studiendesign, Probanden

### 2.1 Wahl der Haltepositionen des Hand-Arm-Systems

Für die Studie wurden vier unterschiedliche Positionen A5, D1, D3 und D4 des Armes festgelegt. Diese wurden anhand des größten Anwendungsbezuges zu realen Haltepositionen an den industriellen Arbeitsplätzen und Studien von Bier (1991) ausgewählt. In Abbildung 1 ist ein Raster der festgelegten Positionen aufgetragen.



**Abbildung 1:** Analysierte Armpositionen für Überkopfarbeit (in Anlehnung an Bier, 1991)

Die vier Positionen sind A5, D1, D3 und D4. A5 repräsentiert das Arbeiten bzw. Halten eines Gegenstandes oder Werkzeugs mit einer maximalen Reichweite des Hand-Armes. D1 geht von einem Anwendungsfall direkt unter dem zu bearbeitenden Werkstück aus, D3 und D4 von Überkopfarbeiten mit einem weiten Abstand zum Objekt.

## 2.2 Probandenkollektiv

An der Studie nahmen insgesamt 23 junge Probanden (16 Männer und 7 Frauen) teil. Der Altersdurchschnitt liegt bei  $23,0 \pm 1,2$  Jahren. Das Durchschnittsgewicht der Probanden liegt bei  $73,5 \pm 12,2$  kg, die Durchschnittsgröße bei  $180,5 \pm 11,3$  cm. Unterschiede bei Körpergröße und -gewicht führen zu einer gewissen Heterogenität des Probandenfelds.

## 2.3 Versuchsaufbau und -ablauf

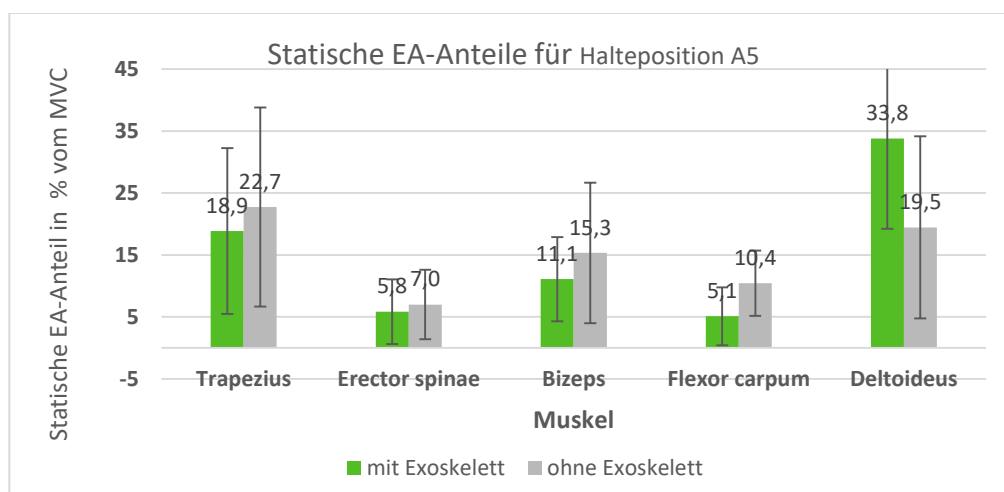
Insgesamt wurde in vier Haltepositionen (A5, D1, D3 und D4) jeweils ein Gewicht von 3,35 kg mit und ohne Exoskelett solange wie möglich gehalten. Um die vorgegebene Erholzeit bei statischen Überkopfarbeit nach Bier (1991) einzuhalten, wurde die Maximalkraft jeder Versuchsperson ermittelt. Insgesamt dauerte ein Versuch ca. 120 Minuten pro Proband.

Die objektiven Beanspruchungsdaten wurden mit Hilfe der Oberflächen-Elektromyographie (OEMG) gemessen. Hierfür wurde ein portables TeleMyo 2400 G2 Gerät von Noraxon verwendet. Die myoelektrischen Signale werden mittels Oberflächenelektroden erfasst. Die elektrischen Aktivitäten folgender fünf Muskeln wurden gemessen und analysiert: m. trapezius pars descendens im Schulter-Nacken-Bereich, m. flexor carpi ulnaris (flexor carpi), m. biceps brachii, m. und deltoideus pars clavicularis im Unter- bzw. Oberarm sowie der m. erector spinae im unteren Rückenbereich. Die erhobenen Daten wurden mithilfe einer MVC-Messung normalisiert. Anschließend wurden die mittleren normierten EA sowie die statischen EA der einzelnen Muskeln und Positionen berechnet und mithilfe von t-Tests statistisch auf Unterschiede geprüft.

## 3. Ergebnisse

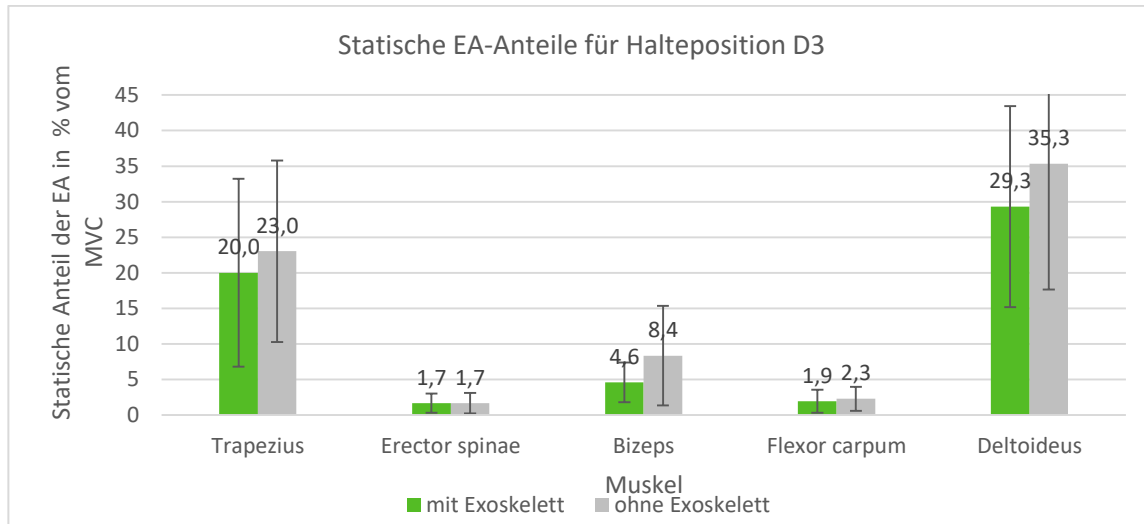
In Abbildung 3 sind die Ergebnisse bezüglich der muskulären Beanspruchung über alle Muskeln für Position A5 (Hand-Arm vollausgestreckt) dargestellt. Es zeigt sich eine signifikante Beanspruchungsreduzierung (0,05-Niveau) bei drei Muskeln bei Anwendung des Exoskelettes. Ausnahmen sind der m. deltoideus und der m. erector spinae.

Ein ähnliches Bild ergab sich für die Haltepositionen D3 und D4 (s. Abbildung 4).



**Abbildung 3:** Mittelwerte der statischen EA-Anteile in % MVC für alle analysierten Muskeln mit und ohne Exoskelett bei **Position A5** über alle 23 Probanden

Bei Position D3 weisen drei der fünf Muskeln einen signifikanten Unterschied zwischen den Werten mit und ohne Exoskelett auf. So konnte bei dem m. trapezius mit einem p-Wert von 0,019, bei dem m. biceps mit einem Wert von 0,006 und bei dem m. deltoideus mit einem Wert von 0,009 ein signifikant höherer Wert als bei Versuchen ohne Einsatz von Exoskeletten nachgewiesen werden.



**Abbildung 4:** Mittelwerte der statischen EA-Anteile in % MVC für alle analysierten Muskeln mit und ohne Exoskelett bei **Position D3** über alle 23 Probanden

Bei Position D4 konnten bei dem Muskel m. biceps, mit einem Wert von 0,01 und bei dem m. deltoideus mit einem Wert von 0,025 ein signifikant höherer Wert bei Versuchen ohne Exoskelett nachgewiesen werden.

Deutlich geringere muskuläre Beanspruchung wurde für die analysierten Muskeln bei der Halteposition D1 gemessen. EA-Aktivitäten des m. erector spinae wurden bei dieser Position nicht betrachtet.

Hier konnten auch keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Anwendung der Exoskelette festgestellt werden. Ausnahme bildet der m. deltoideus – hier ist ein signifikanter Unterschied mit einem p-Wert von 0,021 feststellbar.

#### EA-Mittelwerte

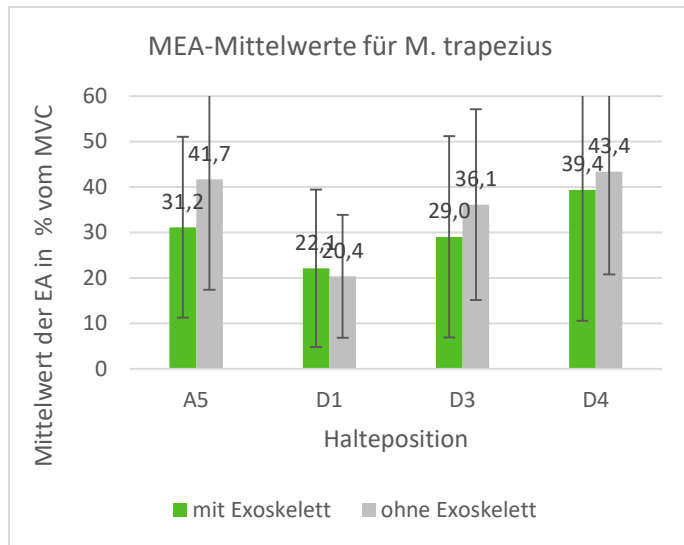
Gleichzeitig werden die Mittelwerte der EA analog zur Studie-Bier (1991) für eine Position und einen Muskel jeweils mit und ohne Exoskelett gemittelt und für einen Vergleich verwendet. In Abbildungen Abb. 5a und 6a sind die gemittelte EA für m. trapezius und m. deltoideus dargestellt.

Erwartungsgemäß sind die mittleren EA deutlich höher als die statischen EA.

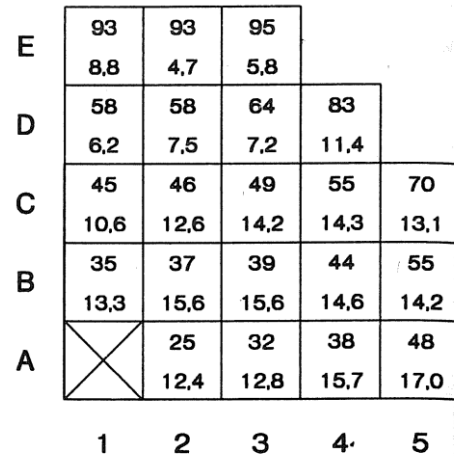
## 4. Diskussion

Die in dieser Studie ermittelten Werte der mittleren EA ohne Exoskelett sind sowohl im m. deltoideus als auch im m. trapezius deutlich niedriger als in der Studie von Bier (1991) (Abbildungen 5a, 5b und Abbildungen 6a, 6b). So liegt zum Beispiel in der Position A5 der normierte EA-Wert von Bier mit 63% (SD 16,1%) deutlich über denen in dieser Studie ermittelten Werte mit 32,5% (SD 21,4%). Die am nächsten beieinanderliegenden Werte sind bei Position D3 erkennbar. So liegt hier der Wert von Bier bei 60% (SD 11,6%). Der MEA-Wert dieser Studie liegt bei 56% (SD 26,8%). Dieses

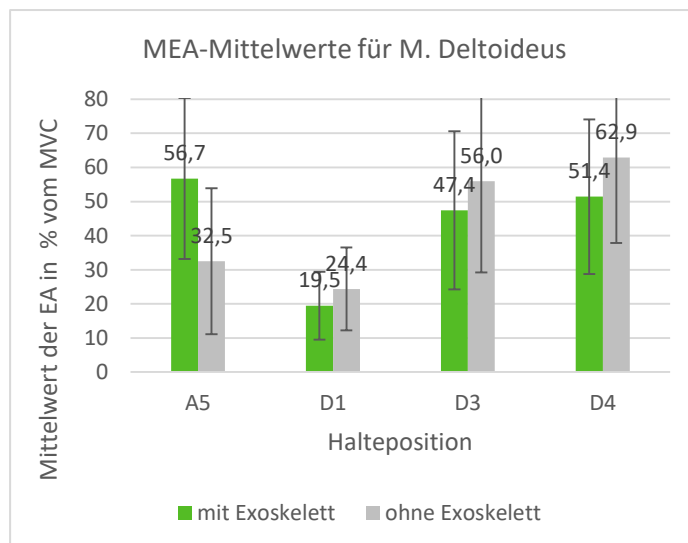
könnte an Unterschieden im Probandenkollektiv und in den Unterschieden in dem gehaltenen Lastgewicht liegen.



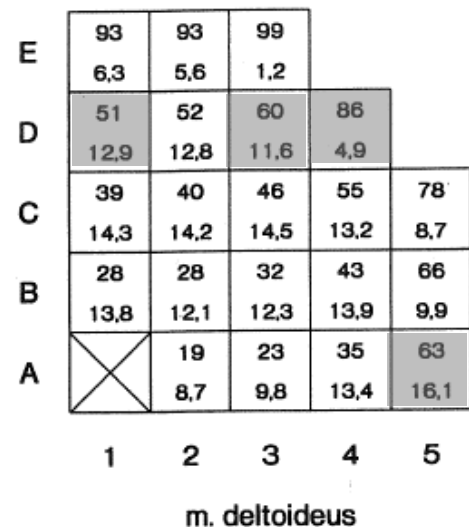
**Abb. 5a:** Mittlere normierte EA für m. trapezius aus dieser Laborstudie



**Abb. 5b:** Mittlere normierte MEA für m. trapezius (Bier, 1991) (obere Zahl) in % und SD (untere Zahl) in %



**Abb. 6a:** Mittlere normierte EA für m. deltoideus aus dieser Laborstudie



**Abb. 6b:** Mittlere normierte MEA für m. deltoideus (Bier, 1991) (obere Zahl) in % und SD (untere Zahl) in %

Die gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der statischen EA zeigen, dass das Exoskelett in den verschiedenen Positionen und in den analysierten Muskeln unterschiedliche lokale Beanspruchung hervorruft. Diese ist in den Muskeln m. trapezius und m. biceps in den Positionen A5, D4 und D3 beim Versuch mit Exoskelett signifikant reduziert. Im m. deltoideus ist hingegen diese Reduzierung lediglich in der Position D4 und D3 signifikant. In der Position A5 ist die statische EA ohne Unterstützung des Exoskelettes niedriger. Auch in der Position D1 konnte bei der EA kein signifikanter Unter-

schied festgestellt werden und die statische EA ist insgesamt niedriger als in den anderen Positionen. Dies deutet vermutlich darauf hin, dass hier durch das Exoskelett eine Veränderung der Belastung/Beanspruchung stattfindet.

## 5. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend zeigt die Laborstudie, dass aktuelle passive Exoskelette für die statische Überkopfarbeit in den untersuchten Positionen des Greifraums (D1, D3, D4, A5) unterschiedliche lokale muskuläre Beanspruchung hervorrufen. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit einem weiten Abstand vom Körper (Positionen D3 und D4) die lokale Beanspruchung im Hand- Arm- System hoch ist und durch den Einsatz des passiven Exoskelettes reduziert werden kann. Bei der Position D1 treten sich die niedrige muskuläre Beanspruchung auf und die Wirkung des Exoskelettes war nicht signifikant nachweisbar. Allerdings beziehen sich diese Aussagen auf diese Studie mit nur einem Exoskelett sowie eine statische Halteaufgabe.

## 6. Literatur

- Bier, M. (1991) Ergonomie der Überkopfarbeit (Fortschritt-Ber. VDI Reihe 17). Düsseldorf: VDI-Verlag
- Butler, T. & Wisner, D. (2017). Exoskeleton Technology: Making Workers Safer and More Productive. Gehalten auf der ASSE Professional Development Conference and Exposition, American Society of Safety Engineers
- Hensel R, Keil M (2018) Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (2018) 72:252–263; <https://doi.org/10.1007/s41449-018-0122-y>
- De Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O’Sullivan LW (2016) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5):671–681
- Heckelmann P, Quaschner R, Storz S, Wiedemann J (2019) Messung und Analyse der Beanspruchung und Erholzeit bei der statischen Überkopfarbeit mit passiven Exoskeletten. ARP, IAD, TU Darmstadt
- Moyon, A., Poirson, E. & Petiot, J.-F. (2018). Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations (28th CIRP Design Conference 2018, 23-25 May 2018, Nantes, France). *Procedia CIRP*, 70, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.028>
- Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M. A. & Agnew, M. J. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57 (12), 1864–1874. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>
- Spada S., Ghibaudo L., Gilotta S., Gastaldi L., Cavatorta M. (2017) Analysis of Exoskeleton Introduction in Industrial Reality... In: R.S. Goonetilleke and W. Karwowski (eds.) *Advances in Physical Ergonomics and Human Factors, Advances in intelligent Systems and Computing* 602.
- Spada S, Ghibaudo L, Carnazzo Ch, Gastaldi L, Cavatorta M. (2018) Passive Upper Limb Exoskeletons: An Experimental Campaign with workers. In: IEA 2018, Florenz.
- Voilqu’e A.; J. Masood J, JC. Fauroux, L. Sabourin, O. Guezet (2019) Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural analysis and Structural complexity indicator. *Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon)*, Scottsdale, AZ, USA, March 26-28, 2019
- Wakula J, Steinebach T, Steidel V, Wolff J (2019) Erarbeiten und Testen eines Konzeptes zur Analyse von körperlichen Belastungen und physiologischer Beanspruchung bei der Überkopfarbeit mit und ohne passive Exoskelette. GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2019, Dresden
- Wakula, J. (2017) Technische Unterstützungssysteme allgemein und Exoskelette im Blickwinkel der Ergonomie“ Vortrag. *AutoErg in Stuttgart*, 16.11.2017. <http://www.autoerg.net/>
- Weidner R., Redlich T und J.P. Wulfsberg, (2014): Passive und aktive Unterstützungssysteme für die Produktion. *Werkstattstechnik online*. Jahrgang 104 (2014) H.9 S. 561-566.

**Danksagung:** Den Herren P. Heckelmann, R. Quaschner, S. Storz, J. Wiedemann danken wir für die Unterstützung im Rahmen des ARP.



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](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)