Analyse der Durchblutung in ausgewählten Schultermuskeln bei der Ausführung statischer Überkopfarbeit mit passivem Exoskelett in einer Laborstudie

Maximilian PÄTZOLD, Verena KLAER, Jurij WAKULA

Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, D-64287 Darmstadt

Kurzfassung: Im Rahmen einer Laborstudie am IAD der TU Darmstadt wurde die lokale Durchblutung in zwei Muskeln des Arm-Schulter-Systems mit und ohne passivem Exoskelett während statischer Überkopfarbeit untersucht. Die Analyse fand mit 10 männlichen Probanden in zwei statischen Haltungen, eine im Beginn und eine im Bereich starker Überkopfarbeit statt. Die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) wurde eingesetzt, um die lokale Sauerstoffsättigung (TSI%) in den tiefen Muskelschichten zu messen. Mit dem Exoskelett konnte eine bessere Oxygenierung des M. deltoideus pars acromialis gezeigt werden. Dies äußert sich in einer geringeren Entsättigungsgeschwindigkeit der Sauerstoffsättigung sowie einer geringfügig höheren Sauerstoffsättigung nach Erreichen eines stationären Zustands unter Last.

Schlüsselwörter: passives Exoskelett, NIRS, Überkopfarbeit, Durchblutung, Sauerstoffsättigung

1. Einleitung

Durch den Einsatz von passiven Exoskeletten für die Überkopfarbeit soll die physiologische lokale Beanspruchung, hervorgerufen durch ergonomisch belastende statische Überkopfarbeit (Haltungs- und Haltearbeit), reduziert bzw. in andere Körperbereiche verlagert werden. Zu den Auswirkungen des Einsatzes von passiven Exoskeletten (z.B. PAEXO-Shoulder von Ottobock, Comau MATE von COMAU) liegen bereits Ergebnisse aus der Forschung vor (z. B. Henzel et al. 2018; Spada et al. 2018; Wakula et al. 2019, 2020). Zur Untersuchung der Wirkung passiver Exoskelette auf die Skelettmuskulatur hat sich hierbei die Elektromyographie (EMG) etabliert.

Wenig erforscht ist die Fragestellung, ob der Einsatz eines passiven Exoskeletts bei länger andauernde statischer Überkopfarbeit einen Einfluss auf die Durchblutung und damit die Sauerstoffversorgung der Muskeln in den oberen Extremitäten hat. Erste Erkenntnisse zur Wirkung von passiven Exoskeletten auf den globalen Sauerstoffverbrauch (Maurice et al. 2020) oder auf die lokale Sauerstoffsättigung (Hefferle et al. 2020) wurden publiziert. Ergänzend zu den Erkenntnissen von Hefferle (2019, 2020) und Filligoi (2007) wurde am IAD ein Laborversuch zur Messung der Sauerstoffsättigung in den tiefen Muskelschichten mithilfe der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) durchgeführt. Es soll die Frage geklärt werden, ob der Einsatz eines passiven Exoskeletts während statischer Überkopfarbeit in definierten Haltungen nach Bier (1991) einen positiven Effekt auf die Sauerstoffsättigung zweier Muskeln im Arm-Schulter-System hat.

Licence: CC BY-NC 4.0 / Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

2. Studiendesign und Auswertungsmethodik

2.1 Studiendesign

Aufbauend auf den vorangegangenen Arbeiten am Institut (vgl. Wakula 2020) wurde ein Halteversuch zum Einsatz des PortaMon NIRS (Artinis Medical Systems) unter Einsatz des passiven Exoskeletts Paexo Shoulder (Ottobock) konzipiert. Die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) wurde nach dem Vergleich verschiedener Durchblutungsmessverfahren als geeignetste Methode gewählt, da NIRS in die tiefen Muskelschichten vordringen kann und es ermöglicht, lokale Messgrößen nichtinvasiv und nicht zeitverzögert zu erfassen. Gemessen wurde die Sauerstoffsättigung bzw. „tissue saturation index“ (TSI%) im Gewebe zweier Muskeln.

Die Wahl der zwei zu messenden Muskeln fällt analog zu vorangegangenen EMG-Studien (z.B. Wakula et al. (2020)) auf den Bizeps (M. biceps brachii) und auf den mittleren Deltamuskel (M. deltoideus pars acromialis). Dies ergänzt die NIRS-Messungen von Hefferle (2019). Die Platzierung des Messgeräts erfolgte, wie in Abbildung 1 dargestellt, analog zu EMG-Messungen nach den Anweisungen des SENIAM Projekts (SENIAM 2004).

Die Halteversuche werden in den von Bier (1991) definierten Armpositionen A5 und D3 durchgeführt, in welchen eine maximale Streckung des Hand-Arm-Systems vorliegt (siehe Abbildung 1). Die Positionen wurden gewählt, um zwei Haltungen im Bereich einsetzender (A5) und starker Überkopfarbeit (D3) abzubilden. Für reale industrielle Arbeitsplätze liegen die mittleren Greifpunktkoordinaten bei Überkopfarbeit in den Positionen C3 und D3 (Bier 1991).

An der Studie nahmen 10 männliche Probanden teil. Das Durchschnittsalter betrug 27,1 ± 11,4 Jahre. Bei der Probandenauswahl wurde auf einen vergleichbaren BMI von 23,26 ± 2,58 kg/m² sowie eine ähnliche Hautpigmentierung geachtet, um menschbezogene Einflüsse auf die Messergebnisse zu reduzieren. Die Studie fand unter Einschränkungen aufgrund der SARS-CoV-2 Pandemie unter Beachtung des Hygienekonzeptes der TU Darmstadt statt.

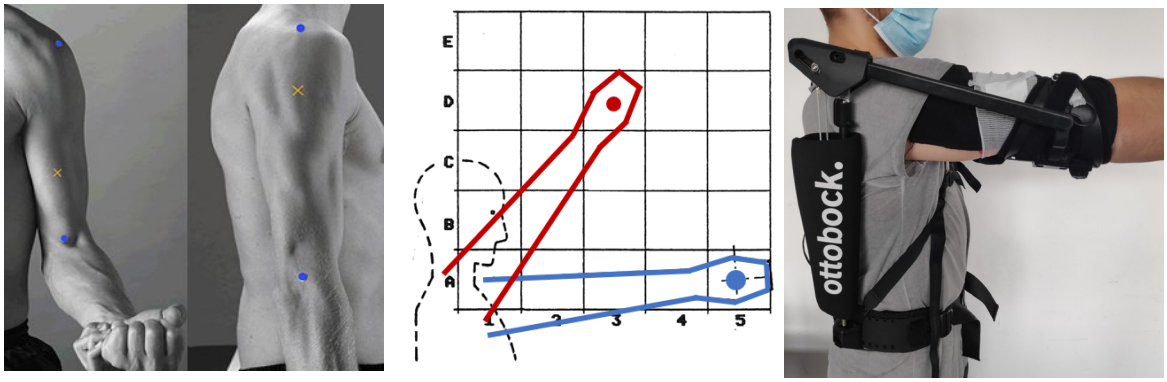

***Abbildung 1**:* Links – Platzierungspunkte des Messgeräts auf M. biceps brachii und M. deltoideus pars acromialis nach SENIAM (2004). Mitte – Armpositionen A5 (blau) und D3 (rot) nach Bier (1991). Rechts – Proband mit PortaMon NIRS und passivem Exoskelett Paexo Shoulder.

Mit zwei Armpositionen, zwei zu messenden Muskeln und mit bzw. ohne Exoskelett ergeben sich acht zu absolvierende Halteaufgaben je Proband. In den Aufgaben wurde eine 5 kg schwere Hantel beidhändig gehalten.

Die Haltedauer betrug 50% der individuellen maximalen Haltezeit in den jeweiligen Positionen, um zwischen den Probanden eine ähnliche Beanspruchung zu erzeugen. Um Ermüdungseffekten vorzubeugen, wurde nach jeder Aufgabe eine Pause durchgeführt. Die Pausenzeit wurde individuell nach Bier (1991) bestimmt. Nach den Pausen wurde die subjektiv empfundene Beanspruchungshöhe und empfundene Länge der Erholungspause mittels einer Likert-Skala erhoben. Die Probanden wurden in zwei Gruppen eingeteilt, für welche die Abfolge der Aufgaben gespiegelt wurde. Der Versuchsablauf der ersten Gruppe ist in Abbildung 3 dargestellt, die Versuchszeit betrug insgesamt ca. 2,5 Stunden, wovon ein Großteil auf die Erholungspausen zwischen den Aufgaben entfällt.

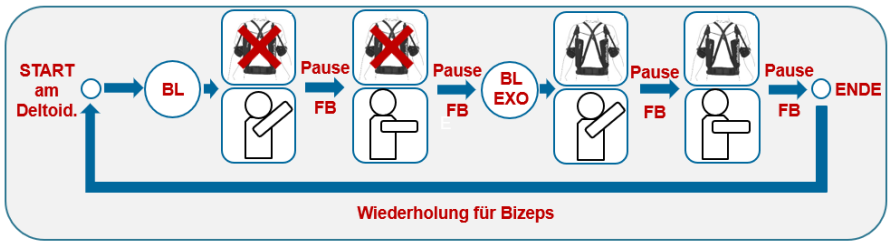

***Abbildung 3**:* Versuchsablauf für die erste Gruppe

2.2 Auswertungsmethodik

Die Daten werden mittels Oxysoft (Artinis Medical Systems) aufgezeichnet und in Matlab (MathWorks, Inc. Ver. R2020b) ausgewertet. Für den Schultermuskel M. deltoideus pars acromialis ist in allen Messungen ein charakteristischer Verlauf der Sauerstoffsättigungskurve (TSI%) unter Last erkennbar (siehe Abbildung 4). Für die Datenauswertung werden angelehnt an Filligoi (2007) aus der Sauerstoffsättigungskurve (TSI%) Analyseparameter abgeleitet. Der Verlauf teilt sich in zwei Phasen: eine annährend lineare Entsättigungsphase mit der Steigung bzw. Entsättigungsgeschwindigkeit m und anschließend eine stabile Phase zum Versuchsende hin. Dabei ist die Saustoffsättigung im Mittel auf einem um ΔTSI% geringeren Sauerstoffsättigungsniveau gegenüber der Baseline.

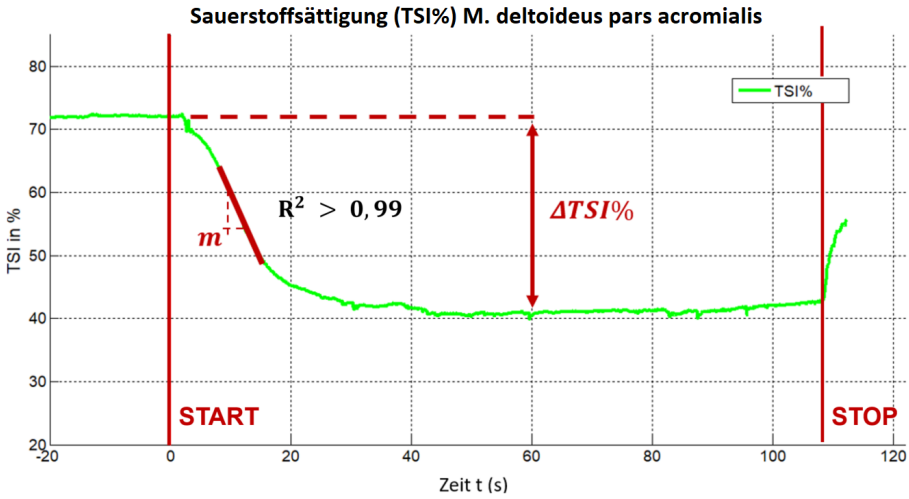

***Abbildung 4**:* Kurve der Sauerstoffsättigung des M. deltoideus pars acromialis eines Probanden unter Last. Der charakteristische Verlauf ist bei allen Probanden ersichtlich.

Um Einflüsse des Exoskeletts zu untersuchen, wird die intraindividuelle prozentuale Differenz der Entsättigungsgeschwindigkeit Δm definiert zu: $\Delta m = \frac{m_{Exo} - m_{ohneExo}}{m_{ohneExo}}$. Die intraindividuelle Differenz der resultierenden Entsättigungshöhe aufgrund des Exoskeletts berechnet sich zu: $\Delta TSI\%_{Diff} = \Delta TSI\%_{Exo} - \Delta TSI\%_{ohneExo}$.

3. Ergebnisse

Für den M. biceps brachii bildete sich die charakteristische Kurve aufgrund der fehlenden Muskelkontraktion in den gewählten Armhaltungen nicht aus. Stattdessen konnte eine Steigerung der Muskeloxygenierung des Biceps während der Belastungsphase gemessen werden. Im Folgenden wird sich auf die Analyse des M. deltoideus pars acromialis beschränkt.

Die prozentuale Änderung der Entsättigungsgeschwindigkeit Δm im M. deltoideus pars acromialis für die Positionen A5 und D3 aller Probanden ist in Abbildung 5 dargestellt. In beiden Positionen ist für den Großteil der Messungen ein positives Δm durch das Exoskelett ersichtlich, was einer Verlangsamung des Entsättigungsprozesses des Muskels von Sauerstoff entspricht. Wird Proband MA19 exkludiert, so beträgt die Verbesserung im Schnitt 21,13% ± 16,12% (A5) bzw. 15,95% ± 13,45% (D3). Eine statistische Analyse mittels des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ergibt, dass die Abweichung von Δm und damit der entsättigungshemmende Einfluss des Exoskeletts in A5 mit p = 0,0039 und in D3 mit p = 0,0098 statistisch signifikant ist.

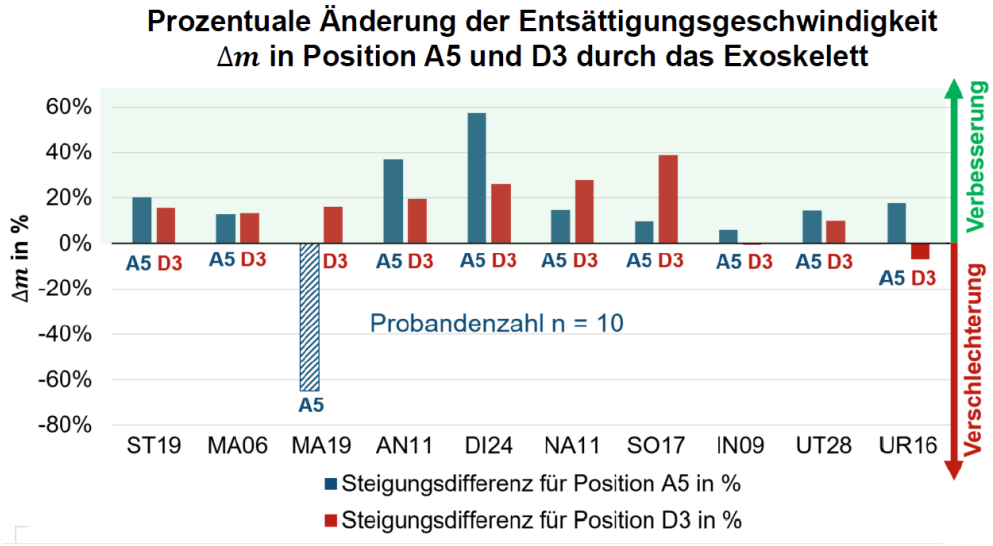

Abbildung 5: Prozentuale Änderung der Entsättigungsgeschwindigkeit Δm im M. deltoideus pars acromialis durch das Exoskelett für 10 Probanden in den Armpositionen A5 und D3

Die Differenz der Entsättigungshöhe $\Delta TSI\%_{Diff}$ durch das Exoskelett ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Entsättigungshöhe in den meisten Messungen durch das Exoskelett gesunken ist und sich die stabile Phase demnach auf einem Niveau höherer Muskeloxygenierung ausbildete. Im Durchschnitt sank die Sauerstoffkonzentration um 1,77% ± 2,54% (A5) bzw. 1,94% ± 3,5% (D3) weniger durch Einsatz des Exoskeletts. Die Änderung ist statistisch signifikant in A5 mit p = 0,0303 und in D3 mit p = 0,0068.

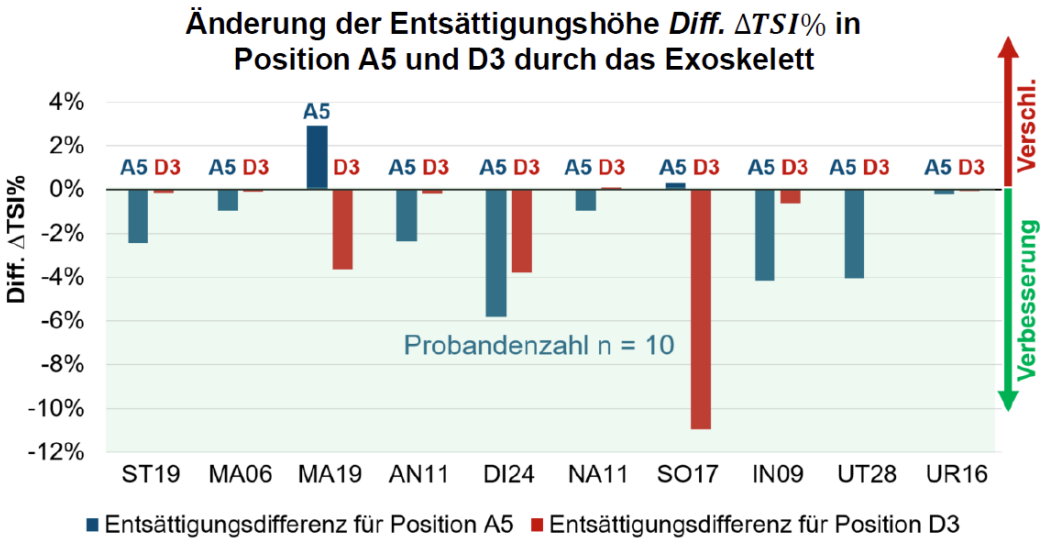

***Abbildung 6**:* Änderung der Entsättigungshöhe ΔTSI% im M. deltoideus pars acromialis durch das Exoskelett für 10 Probanden in Armpositionen A5 und D3

4. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen eine statistisch signifikante Änderung der Entsättigungshöhe und der Entsättigungsgeschwindigkeit im Deltoideus pars acromialis zwischen den Versuchsbedingungen mit und ohne Exoskelett in beiden Armhaltungen.

Die Differenz $\Delta TSI\%_{Diff}$ ist gering gegenüber Schwankungen, die im Versuch durch kleine Bewegungen der Gliedmaßen beobachtet wurden. Daher sollten weite Untersuchungen mit dynamischen Arbeitsabläufen durchgeführt werden, um die Übertragbarkeit auf ein reales Arbeitsumfeld zu erhöhen.

In den Armhaltungen A5 und D3 konnte kein charakteristischer Verlauf für den M. biceps brachii gemessen werden. In der Literatur sind zum M. deltoideus pars acromialis ähnliche charakteristische Verläufe ebenfalls für den M. biceps brachii während statischer Muskelkontraktion zu finden (vgl. Filligoi 2007). Messungen in weiteren Armpositionen (z. B. mit angewinkelten Armen) und eine Erweiterung der Muskelauswahl sind vonnöten, um ein umfassenderes Bild der Wirkkette zu erhalten.

In Anlehnung an die Erkenntnisse von Filligoi (2007) hinsichtlich des Einflusses des Lastgewichts auf die Entsättigungskurve sollte die Wirkung des Exoskeletts zudem bei unterschiedlichen Lastgewichten geprüft werden. Ebenso sollte das Probandenkollektiv in weiteren Studien erweitert werden. Hierbei wären insbesondere auch Einflüsse des Alters relevant.

Obwohl Position D3 im Bereich starker Überkopfarbeit liegt, wurde eine höhere, subjektiv empfundene Beanspruchung im Bereich A5 angegeben, welches durch ein größeres Moment um die Schulterachse erklärt wird. Die Probanden berichteten aufgrund der hohen relativen Beanspruchungsdauer von 50% ihrer maximalen Haltezeit von Ermüdung während des Versuchs, obwohl die subjektiv empfundene Länge der Erholungspausen als ausreichend angegeben wurde.

NIRS erwies sich als eine geeignete Methode zur Messung der Durchblutung bei statischen Aufgaben, aber es fehlen die Standardisierung des Verfahrens, Grenzwerte und Bewertungskriterien zur Interpretation und Einordnung der Ergebnisse.

5. Fazit und Ausblick

In einer Laborstudie wurde der Einfluss des passiven Exoskeletts auf die Oxygenierung zweier Muskeln während einer statischen Halteaufgabe in zwei Armpositionen nach Bier (1991) im Bereich der Überkopfarbeit untersucht. NIRS erwies sich als eine geeignete Methode zur Messung der Durchblutung bei statischen Aufgaben, mit der weitere Fragestellungen hinsichtlich der Oxigenierung des Handarmsystems bei der Überkopfarbeit mit Exoskeletten untersucht werden können. Beim beidhändigen Halten eines 5 kg schweren Gewichts konnte mit dem Exoskelett eine bessere Oxygenierung des Schultermuskels M. deltoideus pars acromialis während statischer Überkopfarbeit festgestellt werden. Dies zeigt sich in einer statistisch signifikanten Verlangsamung der Entsättigung nach Beginn der statischen Überkopfarbeit am M. deltoideus pars acromialis sowie einer geringfügig höheren Sauerstoffsättigung nach Erreichen eines stationären Zustands unter Last. Für alle Probanden war ein charakteristischer Verlauf der Entsättigungskurve erkennbar. Für den Oberarmmuskel M. biceps brachii konnte dieser Verlauf nicht beobachtet werden, was auf die fehlende Muskelkontraktion in den zwei Armhaltungen zurückgeführt wird.

6. Literatur

Bier M (1991) Ergonomie der Überkopfarbeit (Fortschritt-Berichte VDI @Reihe 17). Düsseldorf: VDI-Verlag.

Filligoi G C (2007) Fast-Slow phaseseparationofNearInfraRedSpectroscopytostudyOxigenationv/s sEMGChanges. In: Jarm T, Kramar P, Zupanic A (Hrsg.) 11th MediterraneanConference on Medical andBiomedical Engineering and Computing 2007, IFMBE Proceedings, Bd.16. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 124-127.

Hefferle M (2019) Ergonomische Evaluation eines Exoskelettes zur Unterstützung von Überkopftätigkeiten.

Hefferle M, Lechner M, Kluth K, Christian M. (2020) Development of a Standardized Ergonomic Assessment Methodology for Exoskeletons Using Both Subjective and Objective Measurement Techniques. In: Chen J (Hrsg) Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing, Bd. 962. Cham: Springer International Publishing, 49-59.

Hensel R, Keil M (2018) Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. Z. Arb. Wiss. 72, 252–263. https://doi.org/10.1007/s41449-018-0122-y.

SENIAM group (2004) Determination of sensor location. Abgerufen am 16. Dezember, 2021. http://www.seniam.org/.

Spada S, Ghibaudo L, Gilotta S, Gastaldi L, Cavatorta M P (2018) Analysis of Exoskeleton Introduction in Industrial Reality: Main Issues and EAWS Risk Assessment. In: Goonetilleke R S, Karwowski W (Eds.) Advances in physical ergonomics and human factors. Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Physical Ergonomics and Human Factors, July 17-21, 2017, the Westin Bonaventure Hotel, Los Angeles, California, USA. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 602, Bd. 602. Cham, Switzerland: Springer, 236-244.

Wakula J, Klaer V, Steinebach T (2020) Analyse des Einflusses von passiven Exoskeletten für Überkopftätigkeiten auf die Haltezeiten von Werkzeugen, die lokale physiologische Beanspruchung und den Bewegungsraum der oberen Extremitäten. ASU - Zeitschrift für medizinische Prävention (09-2020).

Wakula J, Steinebach T, Steidel V (2019) Erarbeiten und Testen eines Konzeptes zur Analyse von körperlichen Belastungen und physiologischer Beanspruchung bei der Überkopfarbeit mit und ohne passive Exoskelette. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg) Arbeit interdisziplinär, analysieren – bewerten – gestalten.

Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© GfA-Press, Sankt Augustin
Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast
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.

Geschäftsstelle der GfA
Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin
info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung
© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse
office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de