

Nutzerakzeptanz industrieller Exoskelette als ergonomische Hilfsmittel in der Automobilindustrie – Ergebnisse einer Feldstudie zur subjektiven Evaluation passiver Überkopf-Exoskelette

Ralph HENSEL, Thomas MAYR, Nelli MILLER, Mathias KEIL

*AUDI AG, Industrial Engineering Tools & Standardization,
Ettinger Straße, D-85045 Ingolstadt*

Kurzfassung: In der Automobilindustrie wird mittlerweile ein Großteil belastender Überkopftätigkeiten (wie beispielsweise das Stopfensetzen oder PVC-Nahtverstreichen in der Lackiererei) von Robotern übernommen, um die Effizienz und Produktivität zu steigern, aber auch die Belastung der Arbeitskräfte zu reduzieren. Zugleich gibt es noch immer eine Vielzahl an Überkopftätigkeiten, beispielsweise in Montage oder Werkzeugbau, die sich aufgrund der Anforderungskomplexität und Variantenvielfalt auch zu Zeiten von Industrie 4.0 nur schwer automatisieren lassen. Vor diesem Hintergrund rückt der Mensch in der Industrie 5.0 (European Commission, 2021) wieder verstärkt in den Mittelpunkt und versucht, die Mitarbeitenden in Industrieunternehmen durch den Einsatz menschenzentrierter Technik bei der Bewältigung ihres Arbeitsalltages zu unterstützen, um gleichermaßen wirtschaftlich und sozial nachhaltige Prozesse zu schaffen. Exoskelette sind in diesem Kontext ein vielversprechender Ansatz, um physische Belastungen zu reduzieren und Körperregionen, die entweder durch belastende Arbeitsaufgaben oder aufgrund spezifischer Vorerkrankungen leistungsgewandelter Mitarbeitender besonders beansprucht werden, gezielt zu entlasten. Da Exoskelette für den Einsatz als ergonomische Unterstützungssysteme in der Industrie noch immer keine Verbreitung finden, untersucht die AUDI AG in Feldstudien neben deren Einsatzpotenzial auch Variablen, die die Akzeptanz der Systeme beeinflussen, um diese im Implementierungsprozess durch ein dezidiertes Change Management gezielt adressieren zu können.

Schlüsselwörter: Exoskelette, Überkopfarbeit, Nutzerakzeptanz

1. Einführung

Gartner, Inc. (2020) betrachtet Human Augmentation als einen Megatrend, um Mitarbeitende in physisch oder psychisch anspruchsvollen Arbeitssituationen zu unterstützen. Insbesondere wenn das Potenzial technischer und organisatorischer Maßnahmen zur ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung ausgeschöpft ist, kommen Exoskelette als innovative ergonomische Hilfsmittel in Betracht, um Mitarbeitende bei besonders belastenden Tätigkeiten in Fertigung und Logistik zu unterstützen (Hensel, Keil, 2019). Vor diesem Hintergrund scheinen Exoskeletten als ergonomische Hilfsmittel für den Einsatz bei Überkopftätigkeiten geradezu prädestiniert zu sein. Diese stellen mit einem Anteil von bis zu 20 % nicht nur einen Belastungsschwerpunkt in der

Automobilproduktion dar, sondern sind aufgrund der schwerwiegenden medizinischen Implikationen als ergonomisch kritisch einzuschätzen, da sie neben der kurzfristig wirksamen Belastung der Arm- und Schultermuskulatur auch langfristig degenerative Erkrankungen der Schultergelenke und Halswirbelsäule mit sich bringen können. Am Markt ist eine Vielzahl unterschiedlicher industrieller Exoskelette für Überkopftätigkeiten verfügbar, die in der Automobilindustrie trotz des vermeintlichen Potenzials noch keine Verbreitung gefunden haben. Der Frage nach möglichen Ursachen geht die AUDI AG im Rahmen von Labor- und Feldstudien nach, um Einflussfaktoren auf die Nutzerakzeptanz identifizieren und den Implementierungsprozess durch ein deziertes Change Management gezielt steuern zu können. Hensel et al. (2020) konnten in einer Laborstudie schon die akzeptanzhinderlichen Einflüsse durch bewegungsinduzierte Effekte bei der Nutzung von Exoskeletten auf die Ausführungsdauer von Arbeitsbewegungen nachweisen. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse einer Interventionsstudie vorgestellt, die den Einfluss von Usability, Trage(dis)komfort und Nützlichkeit auf die Akzeptanz von Exoskeletten untersuchen.

2. Methodik

2.1 Arbeitsplatzauswahl

Ziel der vorliegenden Feldstudie war es, die Tauglichkeit von Überkopf-Exoskeletten für den Einsatz in der Produktion subjektiv zu evaluieren. Im Fokus stand hierbei die Nutzerakzeptanz der Systeme und die Beantwortung der Frage, welchen Einfluss Gebrauchstauglichkeit (Usability) und Nützlichkeit sowie der Trage(dis)komfort auf diese haben.

Zu diesem Zweck wurden auf Basis der Ergonomiebewertung je zwei statische und dynamische Überkopf-Arbeitsplätze mit hoher Belastung im Schulterbereich in verschiedenen Produktionsbereichen ausgewählt (Abbildung 1). Zwei davon waren am Montageband des Audi A3 und Q2, wo die Mitarbeitenden über Kopf Montagetätigkeiten entweder in statischen („Montage und Konnektierung der Bremsleitungen“; AP #1) oder dynamischen Arbeitshaltungen („Montage der CW-Unterbodenverkleidung“; AP #2) ausführen. Ein weiterer Arbeitsplatz (AP #3) war im Werkzeugbau, wo die Werkzeugmechaniker_Innen in statischer Überkopfhaltung die Presswerkzeuge beim Einarbeiten schleifen. Darüber hinaus wurde ein vierter Arbeitsplatz (AP #4) an der Korrosionsschutzlinie in der Lackiererei in die Feldstudie einbezogen; an diesem setzen die Mitarbeitenden in dynamischen Überkopfhaltungen Stopfen in die Karosserie ein. Gemäß dem Arbeitsplatzrotationsregime trugen die Mitarbeitenden an den Montagebändern das Exoskelett im vierwöchigen Test täglich etwa zwei Stunden lang bei einer Zykluszeit von 1,3 Minuten. In der Lackiererei waren die Überkopf-Exoskelette während der gesamten Schicht von sieben Stunden im Einsatz. Wohingegen die Systeme im Werkzeugbau von den Mitarbeitenden nur gelegentlich bei Überkopfarbeiten getragen wurde, da dort kein zyklischer Arbeitsablauf existiert. Insgesamt nahmen 33 Testpersonen an der Feldstudie am deutschen Produktionsstandort in Ingolstadt teil, jeweils sieben Teilnehmer an den beiden Arbeitsplätzen an der Montagelinie sowie der Lackiererei und zwölf im Werkzeugbau.



Abbildung 1: Statische Arbeitsplätze an der Montagelinie (AP #1) und im Werkzeugbau (AP #3)
 (Quelle: Audi Media Center, 2020)

2.2 Vorgehensweise

Für die subjektive Bewertung der Überkopf-Exoskelette wurde ein standardisiertes Befragungstool entwickelt, dessen Validität durch die Verwendung valider Skalen und Items existierender Fragebögen sichergestellt wurde. Zusätzlich begleiteten die Arbeitsmediziner der AUDI AG die Feldstudie. Insbesondere galt es, die potenziellen Testpersonen vor dem Test auf medizinische Kontraindikationen zu untersuchen. Ferner erfolgten sowohl während als auch nach dem Test arbeitsmedizinische Untersuchungen, um arbeitsbedingte Beschwerden oder auch Beeinträchtigungen durch die Nutzung der Exoskelette zu erkennen. Dafür kam die Body Part Discomfort Scale in Kombination mit einer 7-Punkte-Likert-Skala zum Einsatz. Weiterhin wurde die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit des Überkopf-Exoskeletts beim An- und Ablegen sowie bei der Nutzung auf Basis des Technology Usage Inventory (TUI) untersucht (Kothgassner et al., 2013). Basierend auf der Intention-to-Use-Skala des TUI wurde die Verhaltensabsicht zur Nutzung des Überkopf-Exoskeletts von den Testpersonen ebenfalls auf einer 7-stufigen Likert-Skala bewertet. Außerdem wurden in einem Post-Fragebogen die Nützlichkeit (in Anlehnung an TUI) auf einer 7-stufigen Likert-Skala erhoben. Darüber hinaus fand der NASA TLX Verwendung, um die erlebte Arbeitsbelastung bei der Verwendung des Exoskeletts zu bewerten (beschrieben durch die sechs Subskalen: geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung, Frustration) (Hart & Staveland, 1988). Darüber hinaus diente die Kurzversion des User Experience Questionnaire (UEQ-S) der Bewertung des subjektiven Eindrucks der Testpersonen zur User Experience des Exoskeletts, differenziert nach pragmatischer Qualität, mit dem Fokus auf die Nützlichkeit, und hedonischer Qualität (Produktanmutung i.w.S.).

3. Ergebnisse

Mit dem Pre-Fragebogen wurden nach dem ersten Trageversuch zu Beginn des Tests Trage(dis)komfort, Usability und Nutzerakzeptanz bewertet. Wie Abbildung 2 zeigt, bewerteten die Testpersonen die Benutzerfreundlichkeit beim An- und Ablegen höher als bei der Exoskelettnutzung während der Aufgabenausführung. In der Montage (AP #1 & AP #2) wurde die Usability beim An- und Ablegen schlechter bewertet als bei den anderen Arbeitsaufgaben, da die Mitarbeitenden dieses aufgrund

der Arbeitsplatzrotation häufiger (alle zwei Stunden) an- und ablegen sowie die Unterstützungskraft auf den jeweiligen Arbeitsplatz anpassen mussten. Die Testpersonen im Werkzeugbau (AP #3) bewerteten die Gebrauchstauglichkeit des Exoskelettes bei dessen Nutzung indes schlechter, da die nicht-konstante, je nach Arbeitshöhe (bedingt durch die Bauteilgeometrie) variierende Unterstützungskraft kritisiert wurde, die durch die Federkennlinie induziert wird. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in der Nutzerakzeptanz (beschrieben durch die Intention-to-Use) wider, die am dynamischen Überkopfarbeitsplatz in der Montage am höchsten bewertet wurde.

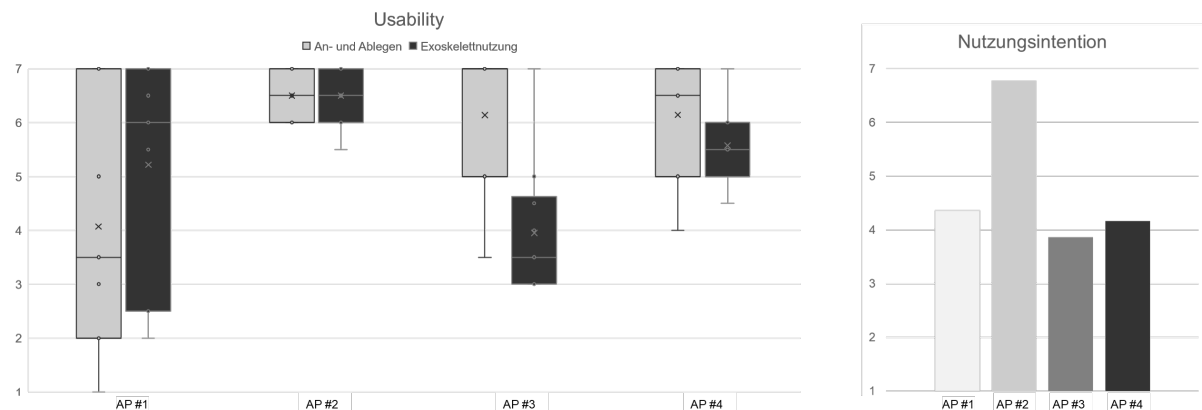


Abbildung 2: Usability beim An- und Ablegen des Exoskeletts sowie dessen Nutzung und Nutzungsintention an den vier Testarbeitsplätzen

Überraschenderweise spiegelte sich dieses Feedback im Studienverlauf nicht wider, da alle sieben Testpersonen aus der Lackiererei (WP #4) und sogar die sieben vom dynamischen Arbeitsplatz der Unterbodenmontage (WP #2) den Test abbrachen.

Der Post-Fragebogen wurde nur von den verbliebenen Teilnehmenden ausgefüllt und untersuchte neben der Nützlichkeit, auch die Freiwilligkeit der Nutzung sowie die erlebte Arbeitsbelastung bei der Verwendung des Exoskeletts mit dem NASA TLX. Zudem wurde mit der Kurzversion des User Experience Questionnaire (UEQ-S) der subjektive Eindruck der Testpersonen zur User Experience des Exoskeletts analysiert.

Wie Abbildung 3 veranschaulicht, hat sowohl die Gebrauchstauglichkeit beim An- und Ablegen als auch bei der Exoskelettnutzung während der Arbeitstätigkeit in der Wahrnehmung der Testpersonen nachgelassen; obgleich nicht statistisch signifikant.

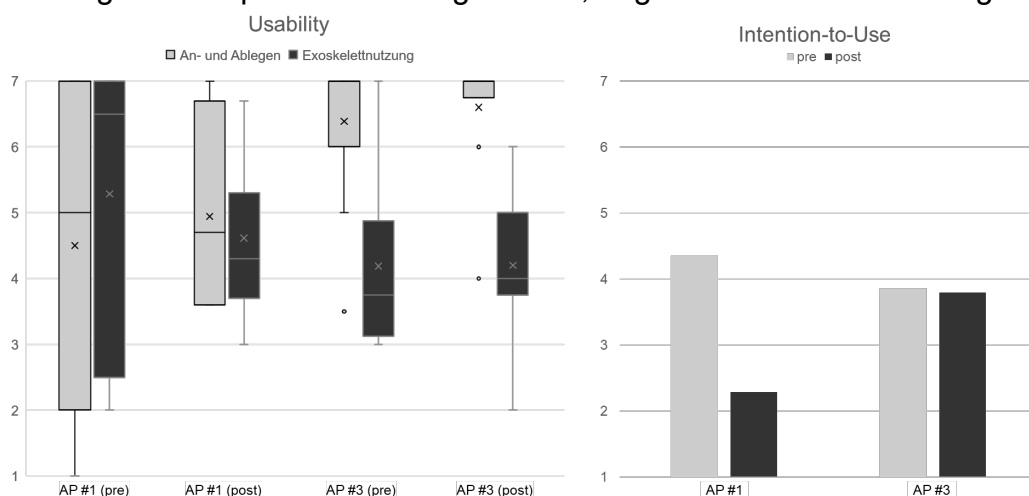


Abbildung 3: Veränderung der wahrgenommenen Gebrauchstauglichkeit und der Nutzungsintention über den vierwöchigen Studienverlauf in Werkzeugbau und Montage

Der wahrgenommene Tragediskomfort stieg – obgleich auf niedrigem Niveau – von durchschnittlich 1,364 zu Beginn des Tests auf 2,016 an dessen Ende signifikant ($p=0,0005$; $\alpha=0,05$; $d=0,626$). Gleichzeitig ist die Nutzungsintention sowohl im Werkzeugbau ($p=0,0048$; $\alpha=0,05$; $d=0,978$) als auch in der Montage ($p=0,0125$; $\alpha=0,05$; $d=0,968$) signifikant gesunken. Die Nützlichkeit wurde von den Testpersonen mit durchschnittlich 3 bewertet. Diese Erkenntnisse werden von den Daten des UEQ-S gestützt. Dieser gibt Ankerpunkte, die Rückschlüsse auf die relative Qualität der evaluierten Überkopf-Exoskelette im Vergleich zu anderen Produkten zulassen. Abbildung 4 zeigt, dass die pragmatische Qualität (Nützlichkeit) leicht unterdurchschnittlich bewertet, während Bewertung der hedonischen Qualität (Produktanmutung) und auch die Gesamtbewertung überdurchschnittlich hoch ausfielen.

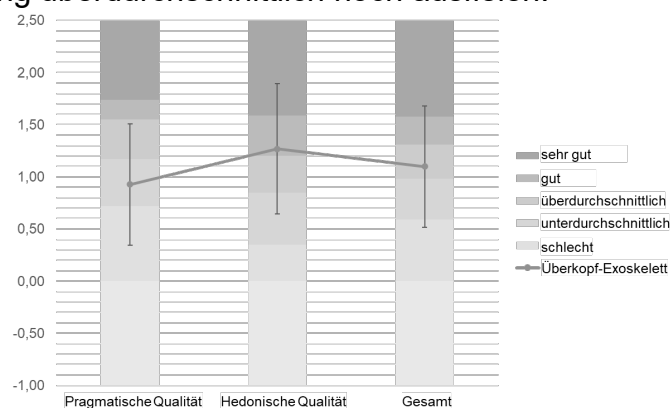


Abbildung 4: Bewertung der User Experience nach pragmatischer und hedonischer Qualität

Die mittels NASA TLX bewertete Arbeitsbelastung unterscheidet sechs Subskalen: geistige, körperliche und zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung, Frustration. Abbildung 5 zeigt, dass die Gesamtbelastung für den Montagearbeitsplatz höher bewertet wurde, stark getrieben durch die erhöhte zeitliche Beanspruchung, was im taktzeitbedingten Zeitdruck an der Montagelinie begründet, liegen könnte.

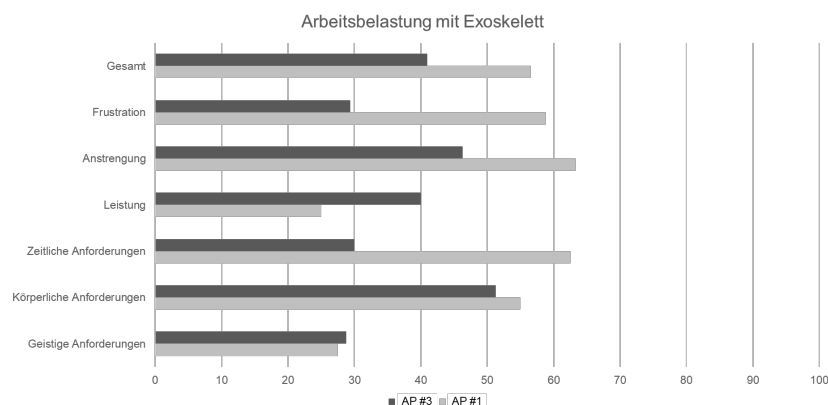


Abbildung 5: Belastung an den Arbeitsplätzen in Werkzeugbau und Montage nach NASA TLX

Mithilfe einer Korrelationsmatrix wurden moderierenden Variablen identifiziert, die die Akzeptanzentscheidung beeinflussen. Dabei konnten durch Korrelationen zwischen Tragediskomfort, Anstrengung und Frustration sowie hedonischer Qualität und Nützlichkeit Prädiktoren zur Vorhersage der Nutzungsintention gefunden werden. Es besteht eine starke negative Korrelation zwischen Tragediskomfort ($\rho = -0,795$), Frustration ($\rho = -0,667$) sowie Anstrengung ($\rho = -0,627$) und der Nutzungsintention

einerseits. Andererseits wurde eine starke positive Korrelation zwischen hedonischer Qualität ($\rho = 0,626$) und Nützlichkeit ($\rho = 0,679$) sowie Nutzungsintention gefunden. Ferner ergab die statistische Auswertung, dass eine höhere zeitliche Beanspruchung auch eine erhöhte körperliche Beanspruchung ($\rho = 0,556$) und Anstrengung ($\rho = 0,653$) erfordert, um die Taktzeit halten zu können, was Frustration ($\rho = 0,694$) und damit letztlich die Ablehnung (Nichtakzeptanz) des Exoskeletts als Assistenzsystem erzeugt.

4. Diskussion

Obwohl die Gebrauchstauglichkeit der Überkopf-Exoskelette zur Unterstützung bei der Ausführung der Arbeitsaufgabe von den Testpersonen an den dynamischen Arbeitsplätzen höher bewertet wurde als bei den statischen und auch die Nutzerakzeptanz an diesen anfänglich höher war, so weist die Anzahl der Studienabbrecher doch darauf hin, dass sie eher dafür geeignet zu sein scheinen, bei statischen Arbeitstätigkeiten in der Automobilindustrie zu unterstützen. Die Ergebnisse der Laborstudie von Hensel et al. (2020) stützen die Erkenntnis der besseren Eignung von Überkopf-Exoskeletten in statischen Arbeitssituationen, da die Nutzenden beim Aktivieren der Federstrukturen der Systeme einen Widerstand überwinden müssen, was zu einer Zeitverzögerung bei der Ausführung dynamischer Arbeitsaufgaben führt, sodass unter Umständen die Taktzeit nicht mehr eingehalten werden kann. Die statistische Auswertung der Feldstudie zeigt deutlich, dass die zeitliche Belastung durch den Taktzeit-bedingten Zeitdruck sowohl zu einer erhöhten körperlichen Belastung als auch zu erbringenden Anstrengung führt, was die Akzeptanz des Exoskeletts als ergonomisches Hilfsmittel bei den Nutzenden stark beeinflusst und sogar die wahrgenommenen positiven Aspekte, wie Nützlichkeit und Produktanmutung, überwiegt. Unterstrichen wird das von der über den Studienverlauf signifikant sinkenden Nutzungsintention vor allem im getakteten Montagebereich. Diesem Umstand sollte im Rahmen der Implementierung von industriellen Exoskeletten als ergonomische Hilfsmittel Rechnung getragen werden.

5. Literatur

- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation (2021) Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office.
- Gartner, Inc. (2020) Top 10 Strategic Technology Trends for 2020. Stamford/ USA.
- Hart SG, Staveland LE (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: Hancock PA, Meshkati N (Eds), Human Mental Workload. Amsterdam: North Holland Press.
- Hensel R, Keil M (2019) Subjective Evaluation of a Passive Industrial Exoskeleton for Lower-back Support: A Field Study in the Automotive Sector, IISE Trans Occup Ergon Hum Factors, 7 (3-4): 213–221.
- Hensel R, Keil M, Sielaff B, Hofmann N, Mayer TA, Maiwald C (2020) Auswirkungen der Nutzung von Exoskeletten auf die zeitliche Bewertung manueller Arbeitsabläufe mit dem MTM-Prozessbaustein-system. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Ed), Digitale Arbeit, Digitaler Wandel, Digitaler Mensch? 66. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Tagungsband. Dortmund: GfA-Press. B.8.4.
- Kothgassner OD, Felnhöfer A, Hauk N, Kastenhofer E, Gomm J, Kryspin-Exner I (2013) Technology Usage Inventory (TUI): Manual.
- Schrepp M, Hinderks A, Thomaschewski J (2017) Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). Int J Interact Multi, 4 (6): 103–108.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

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

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de