

## **Biomechanische Analyse der Unterstützungswirkung von rumpfunterstützenden Exoskeletten bei manueller Lasthandhabung**

Jasper JOHNS, Kai HEINRICH, Ulrich GLITSCH

*Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung  
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin*

**Kurzfassung:** Ziel dieser Untersuchung war die biomechanische Analyse von drei rumpfunterstützenden Exoskeletten (2 passive, 1 aktives) im Hinblick auf die Unterstützungswirkung an der Lendenwirbelsäule beim Anheben von Lasten. Die Unterstützungskennlinien der passiven Exoskelette wurden experimentell ermittelt und in ein biomechanisches Mehrkörpermodell des Muskel-Skelett-Systems implementiert. Das aktive Exoskelett verfügte über eine Drehmomentsensorik mit Online-Übertragungsfunktion. Im Vergleich zum Anheben einer Last von 20 kg ohne Exoskelett erreichten die passiven Exoskelette eine Reduktion des maximalen Gelenkmoments an der Lendenwirbelsäule (L5/S1) zwischen 6,6% und 11,7%. Das aktive Exoskelett konnte aufgrund der Latenz der Regelelektronik zu Beginn des Anhebevorgangs, dem Zeitpunkt des maximalen L5/S1-Gelenkmoments, die LWS-Belastung nur geringfügig reduzieren und erreichte erst im weiteren Verlauf des Aufrichtens bei ca. 35° Rumpfvorneigung die maximale Unterstützungswirkung von bis 70 Nm, was mehr als das 1,6-fache des Höchstwertes der beiden passiven Exoskelette ist. Bei der Beurteilung von Exoskeletten sollten neben dem maximalen Unterstützungseffekt auch die Entwicklung des einwirkenden Unterstützungsmoments über den Verlauf einer Bewegung und in Bezug auf eine sich verändernde Belastung berücksichtigt werden.

**Schlüsselwörter:** Manuelle Lasthandhabung, Lendenwirbelsäule, Exoskelette, Muskel-Skelett-Beschwerden

### **1. Einleitung**

Muskuloskelettale Belastungen am Arbeitsplatz und deren Folgen waren Grund für mehr als 80.000 frühzeitige Rentenzugänge in den Jahren 2015-2018 (BMAS/BAuA 2018). Mit einem Anteil von ca. 25% an allen Arbeitsunfähigkeitstagen gefährdet die Exposition von Arbeitnehmenden wegen mechanischer Überbelastung nicht nur deren finanzielle Absicherung im Alter, sondern auch den Erhalt einer guten Lebensqualität. Konkret stellen sich degenerative Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (LWS) als wiederkehrendes Problem im Arbeitsschutz dar. Unspezifische Schmerzsymptome und Bandscheibenvorfälle treten trotz zunehmender Erkenntnisse auf dem Gebiet der Arbeitswissenschaft mit gleichbleibender Prävalenz auf (BMAS/BAuA 2018). Während die Schulung von Arbeitnehmenden zu gesundheitsbewusstem Verhalten oder die ergonomische Anpassung von Arbeitsplätzen oft wirksam eingesetzt werden, sind diese Maßnahmen nicht an allen Arbeitsplätzen umsetzbar (Abdoli-E & Stevenson 2008). Rumpfunterstützende Exoskelette sind eine neuartige Präventionsmaßnahme, die ver-

spricht wirkende Belastungen auf die LWS zu reduzieren, während das hohe und erforderliche Maß an Flexibilität und Präzision durch Mitarbeitende erhalten werden, die an vielen industriellen Arbeitsplätzen erforderlich sind. Die unterstützende Wirksamkeit der Systeme wurde in den letzten Jahren in einer Vielzahl von Studien mit verschiedenen komplexen Bewertungsansätzen untersucht (de Looze et al. 2016; Glitsch et al. 2020; Koopman et al. 2020; Näf et al. 2018). Die meisten dieser Untersuchungen deuten auf einen generell positiven Effekt von passiven Systemen auf die muskuläre Aktivität des unteren Rückens hin und damit indirekt auf eine Verbesserung der inneren Belastungssituation. In weitaus weniger Studien wurden jedoch speziell diese relevanten biomechanischen Parameter erhoben und direkte Unterstützungswirkung der Exoskelette berücksichtigt. Die komplexe Interaktion zwischen Mensch und Exoskelett und die daraus resultierenden Folgen für die Belastung der LWS war Inhalt dieser Untersuchung.

## 2. Methodik

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Unterstützungswirkung von zwei passiven (Laevo Version 2.5, Laevo, Delft, Niederlande und BackX, SuitX, Emeryville, CA, USA) und einem aktiven Exoskelett (CrayX, German Bionics, Augsburg, Deutschland) bei der Lastenhandhabung analysiert. Um die Unterstützungswirkung der beiden passiven Exoskelette in das zur Berechnung der inneren Belastungen verwendete invers dynamische Mehrkörpermodell implementieren zu können, musste zunächst eine analytische Beschreibung des Unterstützungsmoments über den Verlauf eines Hebezyklus erstellt werden. Dazu wurden mit Hilfe von verschiedenen Kraftsensoren die von der Brustplatte der Exoskelette auf das Sternum übertragenen Kräfte gemessen. Die Unterstützungskennlinien wurden über mehrere Flexions-Extensions-Zyklen einer im Labor nachgestellten Hebeaufgabe aufgezeichnet. Zeitgleich wurde der Exoskelett-Winkel über optische Marker mit 12 Kameras eines Vicon Motion Capture System (Vicon Systems, Oxford, UK) aufgezeichnet. Aus den Werten der verschiedenen Kraftmesssysteme wurde ein mittleres Verhalten der Exoskelette abgeleitet und anschließend der Verlauf der Unterstützungsmomente über den Flexionswinkel der Exoskelette in MATLAB (Release 2019a, The Mathworks, MI, USA) durch mathematische Funktionen beschrieben. Für das aktive Exoskelett wurden die Regelungsparameter so eingestellt, dass die Flexionsphase ohne Lastgewicht nicht unterstützt wurde und erst mit Beginn des Anhebens der Last die Unterstützung einsetzte.

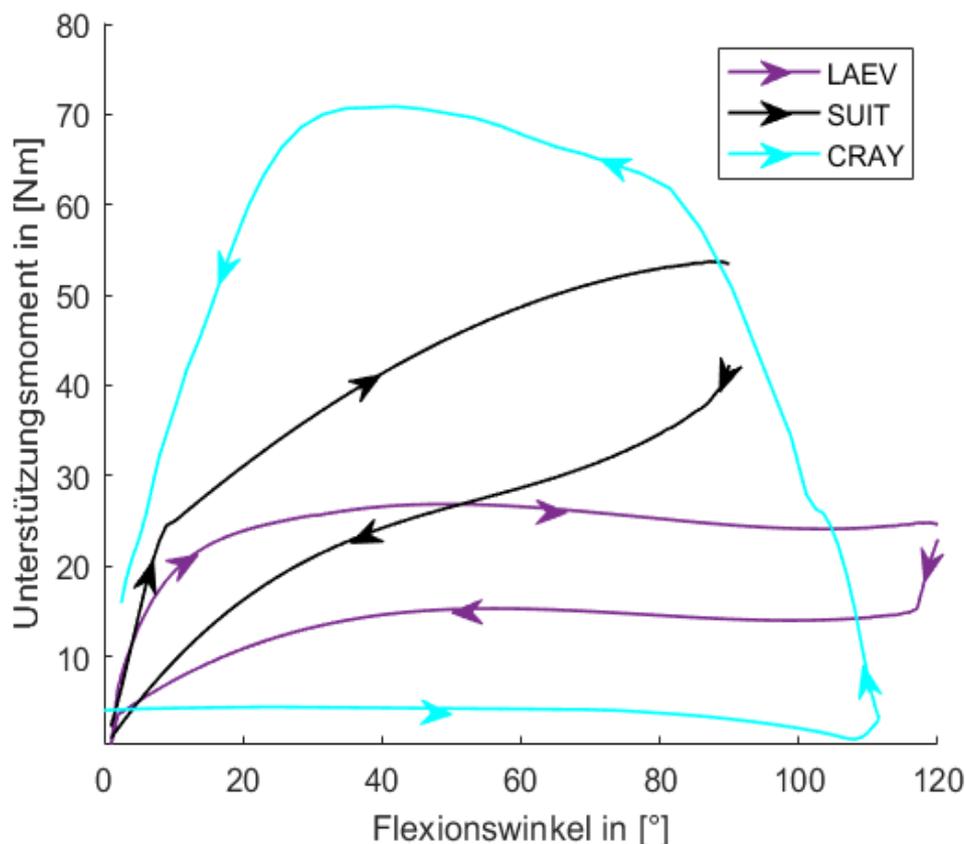
12 Probanden (Alter:  $35 \pm 10,2$  Jahre; Körpergröße:  $1,77 \pm 0,10$  m; Körpergewicht:  $80 \pm 13,6$  kg) wurden während des wiederholten Anhebens eines 20 kg Lastgewichts untersucht. Zur Aufzeichnung der Bewegungsdaten wurden die Probanden mit einem, an das Vicon Plug-In-Gait angelehnten und an den speziellen Fall mit Exoskelett angepassten, Set reflektierender Marker beklebt. Auf Basis eines Satzes kinematischer Daten wurde die Kinetik der verschiedenen Exoskelette angewendet und die Gelenkmomente an L5/S1 mit einem top-down invers dynamischen Mehrkörpermodell berechnet. Die Unterstützung der Exoskelette wurde in dem Modell in Form von Aktionskräften an der Brustplatte des getragenen Exoskeletts berücksichtigt, die sich aus den ermittelten Drehmomentkurven und dem Hebelarm zum Drehzentrum des Exoskelettgelenks ergeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Probanden wurden die Ergebnisse über das Körpergewicht der Probanden normalisiert.

Beim CrayX wurden die Antriebsdrehmomente der Motoren über eine vom Hersteller eingebaute Sensorik erfasst. Es wurde speziell in diesen Versuchen auf eine möglichst natürliche Bewegungsausführung geachtet. Durch ein Verlangsamen der Bewegung hätte eine größere Unterstützungswirkung provoziert werden können, was jedoch jeglicher Praxisrelevanz abgesprochen hätte. Die Ergebnisbetrachtung konzentriert sich für das CrayX auf die Drehmomentunterstützung über den Verlauf bei der Lastenhandhabung.

Zur Beurteilung des Einflusses der Exoskelette auf die Wirbelsäulenbelastung wurden die maximalen Lumbalmomente während der Anhebephase über alle Probanden zwischen den Bedingungen verglichen. Die Mittelwerte, der auf Normalität geprüften Daten, wurden zwischen den entsprechenden Gruppen verglichen. Zudem wurden die Effektstärke nach Cohen und die erreichte Testpower berechnet um die Aussagekraft der Daten besser beurteilen zu können. Die statistischen Analysen wurden mit der *Statistics Toolbox* in MATLAB und der GPower Software (Version 3.1.9.7, Faul et al. 2007) durchgeführt.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Unterstützungskennlinien der Exoskelette



**Abbildung 1:** Unterstützungskennlinien der untersuchten Exoskelette. Dargestellt ist der Verlauf der erzeugten Unterstützungsmomente über den Flexionswinkel im Drehgelenk der Exoskelette während eines Flexions-Extensions-Zyklus einer Hebebewegung.

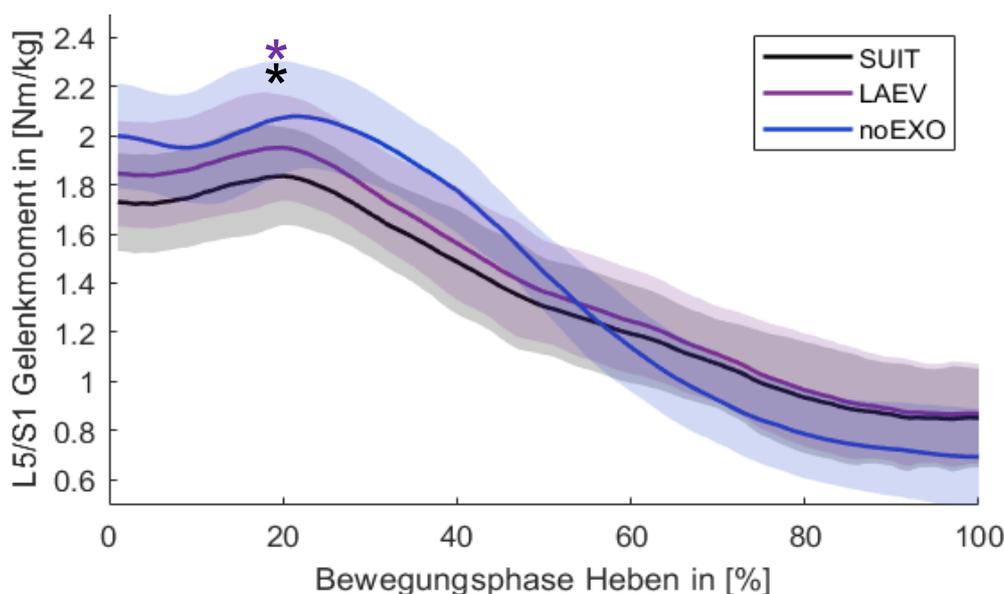
Die in Abbildung 1 gezeigten Unterstützungskennlinien verdeutlichen, über den Verlauf des Flexionswinkels dargestellt, in welcher Phase einer Hebebewegung wie viel

Unterstützungsmoment von den Exoskeletten geliefert wird. Für das Laevo Exoskelett ist ein sehr schnelles Erreichen der maximalen Unterstützung von ca. 26 Nm zu erkennen, welchem eine Phase relativ gleichbleibender Unterstützung zwischen 24 - 26 Nm bis zum Punkt der maximalen Flexion folgt. Das Unterstützungsmoment des SuitX hingegen steigt kontinuierlich bis zum Punkt der maximalen Flexion, an welchem das Maximum von ca. 54 Nm erreicht wird. Beide Exoskelette zeigen abzüglich der durch Hysterese verlorenen Federenergie ein ähnliches Verhalten während der Extensionsphase mit maximalen Unterstützungsmomenten von ca. 15 Nm für das Laevo und ca. 35 Nm für das SuitX. In den Daten für das CrayX ist zu erkennen, dass wie erwartet durch die gewählten Einstellungen nahezu keine Unterstützung während der Flexion geliefert wurde. In der folgenden Extensionsphase wird der Punkt maximaler Unterstützung, bei ca. 35° Flexion erreicht. Die maximale Unterstützung in dieser Phase lag bei ca. 70 Nm. Im Vergleich zu den passiven Exoskeletten konnte das CrayX das 4,4- bzw. 1,6-fache Drehmoment während der Extensionsphase leisten.

### 3.2 Analyse der lumbalen Gelenkmomente

Der Mittelwertvergleich zwischen den Bedingungen mit und ohne Exoskelett konnte für beide passiven Exoskelette eine signifikante Reduktion der Lumbalmomente zeigen. In den Durchgängen ohne Exoskelett traten durchschnittlich  $2,13 \pm 0,23$  Nm/kg am L5/S1 Gelenk auf. Durch das SuitX konnten die wirkenden Belastungen um 11,7% auf  $1,87 \pm 0,21$  Nm/kg ( $p < 0,001$ ,  $d = 1,14$ ) und durch das Laevo um 6,6% auf  $1,98 \pm 0,22$  Nm/kg ( $p = 0,003$ ,  $d = 0,59$ ) gesenkt werden (Abbildung 2). Die berechnete Effektstärke zeigt nach der Interpretation von Cohen für das SuitX einen großen und das Laevo einen mittleren Effekt an. Für das SuitX konnte eine angemessene Test Power von 0,99 gefunden werden, während diese für die Versuche mit dem Laevo mit 0,77 grenzwertig ausfiel.

## 4. Diskussion



**Abbildung 2:** L5/S1 Gelenkmomente während des Anhebens eines 20 kg Lastgewichts für die Bedingungen no Exo, Laevo und SuitX.

\* - Signifikanter Unterschied des Maximums zur no Exo Bedingung ( $p = 0.005$ ).

Die Unterstützungskennlinien der Exoskelette weisen deutliche Unterschiede auf und müssen neben dem schon genannten Parameter der maximalen Unterstützung auch hinsichtlich der Entwicklung der Unterstützung über den Verlauf einer Lastenhandhabung diskutiert werden. Während das Laevo Exoskelett die niedrigste Gesamtunterstützung liefern konnte, stellen der schnelle Anstieg gefolgt von einem gleichbleibenden Verlauf möglicherweise eine sehr benutzerfreundliche Unterstützung dar, die, wie in der Studie von Settembre et al. (2020) bereits gezeigt, die Akzeptanz im Vergleich zu anderen Systemen verbessern kann. Unterstützt wird diese Annahme von einigen Studien in denen die Autoren argumentiert haben, dass der Tragekomfort eine größere Rolle, als die erfahrende Unterstützung für die Benutzerakzeptanz spielt (Baltrusch et al. 2020; Näf et al. 2018; Toxiri et al. 2019). Das vom SuitX erzeugte und stetig steigende Unterstützungsmoment ist demgegenüber eher an die Entwicklung der wirkenden Hüftgelenks- und Lumbalmomente angepasst, was sich in einer größeren Reduktion der L5/S1 Gelenkmomente widerspiegelt. Mit welchem dieser Ansätze bessere Ergebnisse bei der Implementierung an Arbeitsplätzen erzielt werden können, sollte in zukünftigen Studien untersucht werden.

Das vom CrayX erzeugte Unterstützungsmoment weist gegenüber den passiven Systemen die große Besonderheit auf, dass es mit den gewählten Einstellungen keine Unterstützung während der Flexionsphase liefert. Diese Einstellung wurde gewählt, um gezielt die kritische Phase des Anhebens einer externen Last zu unterstützen. Das dabei beobachtete Maximum der Unterstützung bei 35° Rumpfvorbeugung deutet jedoch darauf hin, dass diese Form der Unterstützung nicht optimal zu der oben beschriebenen Entwicklung der Lastmomente passt. Die Latenz der Regelungselektronik und die Trägheit des Systems scheinen es zu verlangen die Einstellungen so zu verändern, dass im hochbelasteten Moment der Lastaufnahme bereits ein relevantes Unterstützungsmoment wirkt.

Im Vergleich zu den von anderer wissenschaftlicher Literatur berichteten Reduktionen des L5/S1-Gelenkmoments durch Exoskelette um 15 - 20% (Abdoli-Eramaki & Stevenson, 2008; Frost et al. 2009; Koopman et al. 2019) fallen die in dieser Untersuchung gefundenen 11,7 und 6,6% relativ gering aus. In der Studie von Koopman et al. (2019) wurden augenscheinlich sehr ähnliche Messungen durchgeführt, da auch das Laevo untersucht und die Gelenkmomente unter Berücksichtigung der Unterstützungskennlinie berechnet wurden. Gründe für die Unterschiede könnten jedoch ein verringertes Bewegungsausmaß (60 - 70° gegen 80 - 90° maximale Rumpfvorneigung), höhere ermittelte Drehmomente (ca. 35 Nm gegen ca. 26 Nm) oder die Berechnung des Einflusses der Exoskelette durch eine globale Momentengleichung - im Vergleich zur Berücksichtigung der Kontaktkräfte in einer invers dynamischen Kettenberechnung - in der Studie von Koopman et al. (2019) sein.

Zusammenfassend konnte in dieser Untersuchung beispielhaft gezeigt werden, wie die Unterstützungskennlinien passiver und aktiver Exoskelette erfasst werden können und wie sich die Unterstützung passiver Systeme auf die Reduktion lumbaler Gelenkmomente auswirken. Außerdem wurde gezeigt, wie sich im Vergleich dazu die Unterstützungswirkung eines aktiven Systems verhält und welche Aspekte bei der Einstellung der Regelungsparameter beachtet werden sollten. Zukünftige Studien sollten darauf abzielen, die komplexe Interaktion von Mensch und Exoskelett besser zu verstehen und messbar zu machen und eine größere Auswahl an Bewegungen zu untersuchen, sowie mögliche adverse Effekte bei der Verwendung von Exoskeletten thematisieren.

## 5. Literatur

- Abdoli-E M, & Stevenson JM (2008) The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clinical Biomechanics*, 23:372–380.
- Baltrusch SJ, Houdijk H, van Dieën JH, van Bennekom, CAM, & de Kruif, AJTCM (2020) Perspectives of End Users on the Potential Use of Trunk Exoskeletons for People With Low-Back Pain: A Focus Group Study. *Human Factors*, 62:365–376.
- Benker R, Heinrich K, & Brüggemann G (2016) Quantifizierung und Bewertung von Belastungen bei der Kabelbaummontage und Simulation einer Entlastung durch ein Unterstützungssystem. Zweite Transdisziplinäre Konferenz „Technische Unterstützungssysteme, Die Die Menschen Wirklich Wollen“, 21–30.
- BMAS/BAuA. (2018) Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit 2018. In Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit - Berichtsjahr 2018. Abgerufen auf: [www.baua.de/suga](http://www.baua.de/suga)
- 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*, 59:671–681.
- Faul F, Erdfelder E, Lang AG, & Buchner A (2007) G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39: 175–191.
- Glitsch U, Bäuerle I, Hertrich L, Heinrich K, & Liedtke M (2020) Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletonen für den industriellen Einsatz. *Zeitschrift Für Arbeitswissenschaft*. 74:294–305
- Glitsch U, Johns J & Heinrich K (2021) Biomechanische Analyse der Wirksamkeit von Exoskeletonen beim Einsatz an industriellen Arbeitsplätzen. GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2021, Bochum, Arbeit HUMAINE gestalten. Beitrag A.5.4
- Frost DM, Abdoli-E M, & Stevenson JM (2009) PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19:e403–e412.
- Koopman AS, Kingma I, Faber GS, de Looze MP & van Dieën JH (2019) Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *Journal of Biomechanics*, 83:97–103.
- Näf MB, Koopman AS, Baltrusch S, Rodriguez-Guerrero C, Vanderborght B, & Lefeber D (2018) Passive Back Support Exoskeleton Improves Range of Motion Using Flexible Beams. *Frontiers in Robotics and AI*, 5:1–16.
- Settembre N, Maurice P, Paysant J, Theurel J, Claudon L, Kimmoun A, Ivaldi S (2020) The use of exoskeletons to help with prone positioning in the intensive care unit during COVID-19. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, (January).
- Toxiri S, Sposito M, Lazzaroni M, Mancini L, Di Pardo M & Caldwell DG (2019) Towards standard specifications for back-support exoskeletons. In *Wearable Robotics: Challenges and Trends* 219-223



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