

Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Exoskeletten unter Einsatz des biomechanischen Menschmodells AnyBody

Lars FRITZSCHE, Michael SPITZHIRN, Christian GÄRTNER

*imk automotive GmbH
Amselgrund 30, D-09128 Chemnitz*

Kurzfassung: Exoskelette können Arbeitskräfte bei ungünstigen Arbeitsbedingungen wie Überkopftätigkeiten körperlich entlasten. Um den Nutzen solcher Assistenzsysteme zu ermitteln, werden Labor- oder Felduntersuchungen verwendet, die jedoch zeit- und kostenaufwendig sind. Simulationen stellen einen alternativen Ansatz zur Effektermittlung dar. Im Rahmen des Beitrags wird eine Methode zur Bewertung von Exoskeletten unter Einsatz des biomechanischen Menschmodells AnyBody vorgestellt. Dazu wird die Ausführung einer definierten Überkopftätigkeit mit und ohne dem Exoskelett Paexo bzgl. der Veränderungen der Muskelaktivitäten, Gelenkreaktionskräfte und Gelenkmomente im Schulter-, Arm-, Rücken- und Hüftbereich untersucht. Erste Ergebnisse mittels der AnyBody-Simulation zeigen eine wesentliche Reduktion der Belastungen im Schulterbereich mit einer Abnahme der Muskelaktivität des M. deltoideus pars clavicularis und pars acromialis sowie Gelenkreaktionskräfte und -momente im Akromio-Clavicular- und Glenohumeralgelenk. Anhand der Ergebnisse kann eine Entlastung des Mitarbeiters bei Überkopfarbeiten beim Einsatz des Paexo vermutet werden. Der Simulationsansatz bietet den Vorteil, dass Untersuchungen bereits in der Planungsphase von Arbeitsprozessen unter Variationen der Arbeitsbedingungen und individuellen Leistungsvoraussetzungen vorgenommen werden können.

Schlüsselwörter: AnyBody, biomechanische Bewertung, digitales Menschmodell, Exoskelette, Überkopfarbeit

1. Ausgangssituation

Erkrankungen des Muskel- und Skelettsystems (MSE) verursachen laut des BBK Gesundheitsatlas 2017 jeden vierten krankheitsbedingten Arbeitsausfall. Neben Schmerzen im unteren Rücken zählen Schmerzen im Schulter-Nackengebiet (Frauen: 63,5 %; Männer: 39,7 %) zu den häufigsten gesundheitlichen Beschwerden (Wittig et al. 2012). Begünstigende Faktoren für MSE sind bspw. statische Haltungen wie Arbeiten über Schulter oder Überkopfarbeit (Luttmann et al. 2003).

Eine gezielte ergonomische Gestaltung des Arbeitsprozesses kann die Risiken für die Entstehung von MSE wesentlich reduzieren (Fritzsche et al. 2019). Notwendige Prozess- oder Produktänderungen können jedoch nicht immer unter wirtschaftlich akzeptablen Konditionen durchgeführt werden, da neben der Gesundheit auch die Wettbewerbsfähigkeit bewahrt werden muss. Eine Möglichkeit, um Belastungen zu reduzieren und damit die Gesundheit der Mitarbeiter zu schützen, besteht im Einsatz von Assistenzsystemen wie Exoskeletten (de Looze et al. 2015).

Bei Exoskeletten handelt es sich um körpergetragene mechanische Strukturen, die einen leistungssteigernden bzw. belastungsreduzierenden Einfluss auf den Körper

ausüben (Hensel & Keil 2018, de Looze et al. 2015). Bei Exoskeletten wird u. a. zwischen aktiven und passiven sowie nach den unterstützenden Körperregionen unterschieden.

Zur Ermittlung des Nutzens von Exoskeletten werden häufig Labor- oder Feldstudien eingesetzt, die zeit- und kostenaufwendig und in der Aussagekraft stark an das Untersuchungsfeld beschränkt sind (Hensel & Keil 2018). Simulationen stellen einen alternativen Ansatz zur Ermittlung der Wirksamkeit von Exoskeletten dar. Dabei werden die meisten der vorhergenannten Einschränkungen umgangen und eine flexible Evaluation von Exoskeletten und ihrer Auswirkungen auf verschiedene Populationen gewährleistet. Im Beitrag wird eine Methode zur Bewertung von Exoskeletten unter Einsatz des biomechanischen Menschmodells AnyBody am Beispiel des passiven Exoskeletts Paexo, welches für Überkopftätigkeiten konzipiert wurde, vorgestellt.

2. Untersuchungsmethodik zur Evaluation von Exoskeletten

2.1 Ziel und Versuchssetting

Mit Hilfe der virtuellen Untersuchungen sollen die Effekte bei der Nutzung des Exoskeletts Paexo im Vergleich zur Ausführung ohne dieses Assistenzsystem bei einer wiederholten Überkopfarbeit quantifiziert werden. Hierzu werden die erfassten Bewegungsdaten aus der realen Laborstudie (Maurice et al. 2019) als Eingangsgröße genutzt sowie die Ergebnisse der virtuellen Untersuchung mit den realen Versuchsergebnissen verglichen.

Insgesamt nahmen 12 gesunde, männliche Probanden (Alter $23,2 \pm 1,2$ Jahre; Körpergröße: $179,3 \pm 5,9$ cm; Körpermasse: $72,7 \pm 5,4$ kg) an der Laborstudie teil. Diese hatten in randomisierter Reihenfolge 24 verschiedene Positionen per Akkuschauber (Masse: 0,66 kg) auf einem Bildschirm zu berühren (Verweildauer: 2s). Damit sollte eine Überkopfarbeit simuliert werden. Die Höhe des Touchscreens wurde auf die Körpergröße des jeweiligen Probanden angepasst. Zur Auswertung wurden die Muskelaktivität von Rücken- und Schultermuskel per EMG-, der Körperschwerpunkt (CoP) per Bodenreaktionskraft- und die Arbeitsbelastung mittels Herzrate- und VO₂-Daten erhoben. Weiterhin wurden die Bewegungen mittels inertialbasierten Motion Capturing Systems der Firma Xsens in Form von BVH-Daten aufgenommen und stehen für die virtuelle Untersuchung zur Verfügung.

Für die virtuelle Untersuchung wird das biomechanische Menschmodell AnyBody Modeling System (AMS) verwendet. Damit können Muskelaktivitäten, Muskelkräfte, Gelenkreaktionskräfte, Gelenkmomente und weitere Parameter untersucht werden. Das System wurde bereits in einigen Studien zur Evaluation von Exoskeletten (Zhou et al. 2017; Spada et al. 2019) eingesetzt. Eine Aussage zum Paexo steht jedoch aus.

2.2 Untersuchungsmethodik zur Quantifizierung von Effekten von Exoskeletten

Am Beispiel der Evaluation des Paexo wird nachfolgend die entwickelte Evaluationsmethode zur Bestimmung der Effekte des Einsatzes von Exoskeletten vorgestellt. Abbildung 1 fasst den Prozess zusammen.

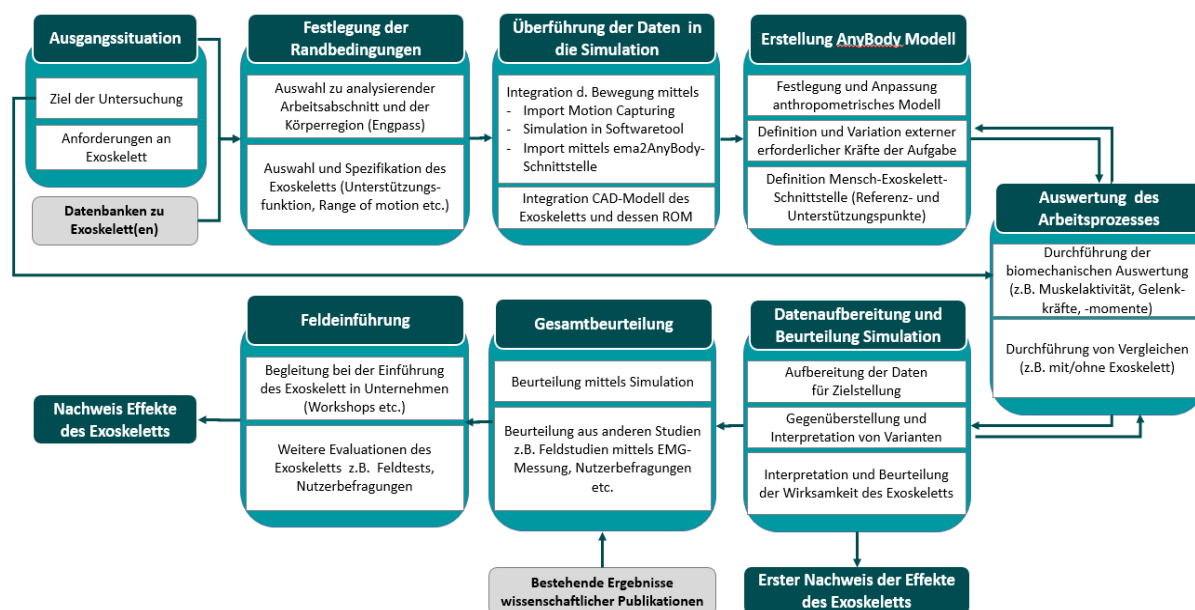


Abbildung 1: Konzept zur Evaluation von Exoskeletten mittels Simulation

Ausgehend von dem identifizierten ergonomisch ungünstig gestalteten Arbeitsprozess (z.B. Überkopfarbeit) ist der Engpass im menschlichen Körper zu ermitteln (z.B. Schulter) und daraus das anzuwendende Exoskelett (z. B. Paexo Shoulder) auszuwählen. Dazu sind unter Beachtung der Untersuchungsziele (Vergleich der Effekte mit /ohne Exoskelett) Anforderungen an das anzuwendende Exoskelett abzuleiten. Dabei spielen sowohl der zu unterstützende Körperbereich, die Anwendungsflexibilität wie auch Produkteigenschaften (Einstellmöglichkeit, Traglast, Sicherheit etc.) eine wichtige Rolle. (Hensel & Keil 2018) Für den Abgleich der Anforderungen mit dem Einsatzgebiet können unternehmensinterne Datenbanken (imk automotive 2019) sowie externe Datenbanken (Marinov 2016) genutzt werden.

Für die Untersuchung wird die Software AMS in der Version 7.2.1 und das AnyBody Managed Model Repository (AMMR) in der Version 2.2.1 verwendet. Für die biomechanische Analyse sind die Eingangsgrößen (Untersuchungspopulation, Bewegung, wirkende Kräfte aus der Arbeitsaufgabe, Arbeitssystemelemente) zu ermitteln und einzufügen. Bei der Population ist darauf zu achten, dass eine repräsentative Gruppe oder Person in Abhängigkeit des Untersuchungsziels genutzt wird. Die Bewegung kann entweder im AnyBody System manuell erstellt oder als aufgenommene Motion Capturing-Daten oder als im Planungssystem ema Work Designer erstellter Arbeitsprozess inkl. Bewegungen, in das AMS importiert werden. Im konkreten Beispiel werden die Bewegungsdaten der 12 Probanden in Form von BVH-Dateien genutzt. Die Bewegungsdatei beinhaltet die Längen und Positionsdaten der einzelnen Segmente. Weiterhin war die Umgebung (Bildschirm, Akkuschauber) sowie das Exoskelett und dessen Verhalten zu modellieren. Zur Modellierung des Exoskeletts gehört neben der Abbildung des Systems (CAD-Daten der Firma ottobock) mit dessen Freiheitsgraden auch die Unterstützungsfunktion. Die Unterstützungsfunktion wurde in Form einer Funktion des übertragenen Drehmoments in Abhängigkeit des Öffnungswinkels des Exoskeletts modelliert, welche auf gemessenen Daten des Herstellers ottobock beruht. Für die Untersuchung der im Menschmodell wirkenden Kräfte wird das „Full Body Model“, ein Ganzkörpermodell mit 154 Gelenken, verwendet. Die Bodenreaktionskraft wurde auf Basis, der im AMS zur Verfügung stehenden automatisiert vorhersagenden

Berechnung in Form der sogenannten „Ground-Reaction Force Prediction“ Funktion eingebunden.

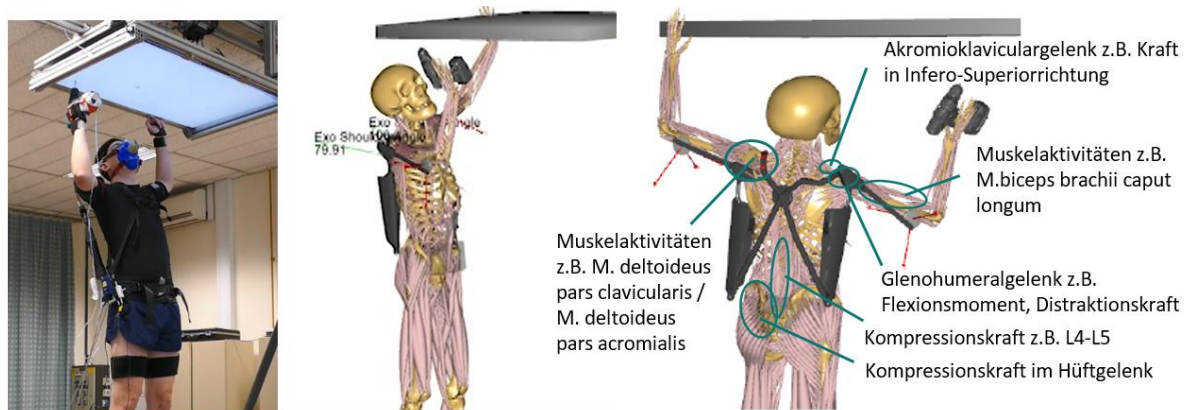


Abbildung 2: Versuchsaufbau nach Maurice et al. 2019 (links), überführtes Szenario in AnyBody (mitte), ausgewählte Untersuchungsvariablen (rechts)

Zur Untersuchung der Effekte zwischen der Bedingung mit und ohne Exoskelett für den Use Case sind die zu untersuchende Position sowie geeignete Auswertungsparameter zu definieren. Im konkreten Beispiel wird sich auf die Muskelaktivitäten, Gelenkreaktionskräfte und Gelenkmomente im Schulter-Arm-Bereich konzentriert, da dort der größte Entlastungseffekt durch das Exoskelett zu erwarten ist. Weiterhin werden auch die genannten Gelenkparameter im Wirbelsäulen- und Hüftbereich betrachtet, um dort eine eventuelle Belastungssteigerung durch eine Umlenkung der Kräfte über das Exoskelett zu identifizieren. Die Auswahl der betrachteten Körperteile orientiert sich an der Auswahl anderer Studien, welche die Auswirkung von Überkopfarbeit auf den Körper betrachten (Benker et al. 2016, Huysamen et al. 2018). Die Parameter sind in Abbildung 2 (rechts) dargestellt.

Die Daten sind entsprechend dem Untersuchungsziel aufzubereiten und hinsichtlich der Effekte auf die Nutzung zu interpretieren. Hierbei wurden im konkreten Beispiel die Muskelaktivitäten der einzelnen Muskelstränge für einen Muskel gemittelt. Für alle Parameter, also der Muskelaktivität für den gesamten Muskel, der Gelenkreaktionskraft und dem Gelenkmoment wurden die Maximal- und Minimalwerte identifiziert, sowie Mittelwert und Median berechnet. Abschließend sind die Ergebnisse zu anderen Untersuchungsergebnissen einzuordnen und können durch Befragungen, die Rückschlüsse auf das Empfinden zulassen, gekoppelt werden.

3. Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich ausgewählter Belastungsgrößen am Beispiel des Probanden 1 für Zyklus 11. Das Maximum der Muskelaktivitäten, Gelenkkräfte und -momente treten beim Handhaben des Akkuschaubers in der Überkopfposition auf.

Der Einsatz des Exoskeletts führt insbesondere zu einer Reduktion der Muskelaktivitäten in den Muskeln M. deltoideus, M. infraspinatus, M. serratus anterior sowie der Gelenkmomente im Schulterbereich (Akromioklavikular- und Glenohumeralgelenk). Gleichzeitig ist aber auch eine Erhöhung der Gelenkmomente im Hüftbereich in Medio-Lateraler Richtung feststellbar.

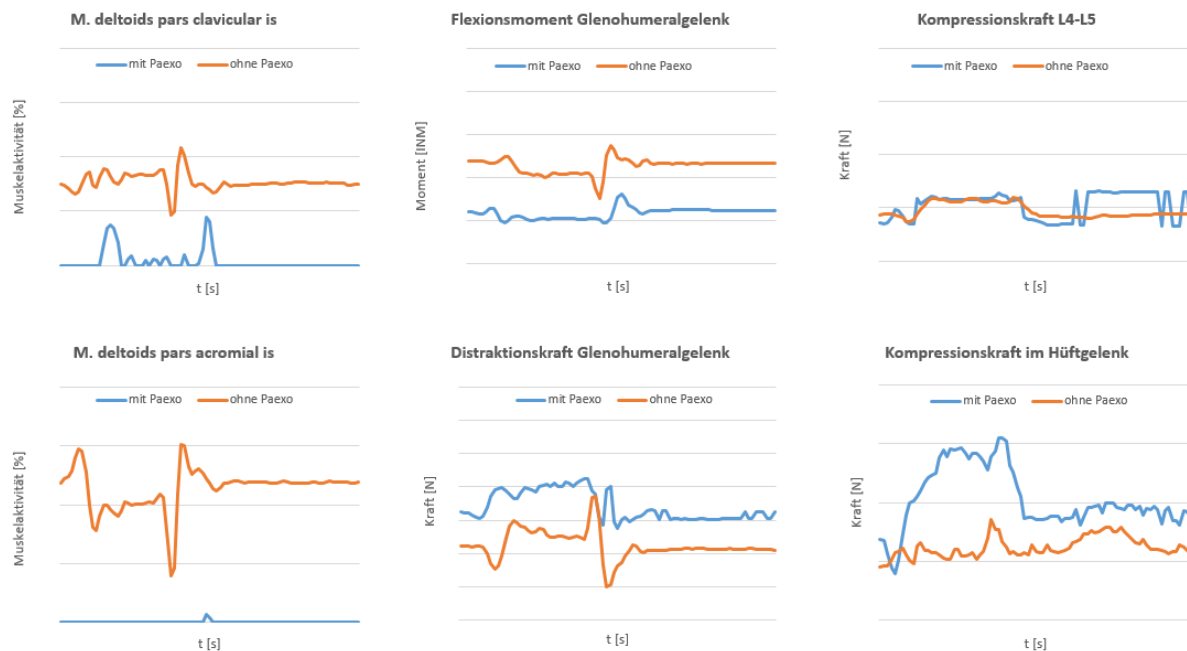


Abbildung 3: Vergleich ausgewählter Belastungsgrößen mit und ohne Paexo bei Überkopfarbeit

4. Diskussion

Die aktuelle Auswertung umfasst nur einen der 12 Probanden, so dass die hier dargestellten Ergebnisse nur eine erste Abschätzung zulassen. Die Ergebnisse ähneln denen der Laborstudie von Maurice et al. (2019), dessen aufgenommene Bewegungen die Basis für die Simulation liefern. In dieser Studie konnte auch eine Reduktion der Muskelaktivität für den M. deltoideus pars clavicularis um mehr als die Hälfte nachgewiesen werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Schmalz et al. (2019), die eine Reduktion der mittleren prozentualen EMG-Amplitude für den M. deltoideus pars clavicularis von knapp 47 %, für den M. deltoideus pars acromialis von 45 % und den M. biceps brachii von 48 %, unter Verwendung des Paexo messen konnten. Eine Belastungsreduktion zeigt sich auch in den Gelenkreaktionskräften und -momenten in verschiedenen Wirkrichtungen im Glenohumeralgelenk. Eine Belastungserhöhung ist in Form eines erhöhten Gelenkmoments im Hüftgelenk zu verzeichnen. Dies kann durch die Umleitung der Kräfte vom Einleitungspunkt am Arm, zu dieser Stelle, durch die Konstruktion des Exoskeletts bewirkt werden.

Die Reduktion der Muskelaktivitäten in den für die Überkopfarbeit relevanten Muskeln M. deltoideus pars clavicularis, M. deltoideus pars acromialis, M. Infraspinatus und M. serratus anterior lässt einen positiven, belastungsreduzierenden Effekt des Exoskeletts während der Überkopftätigkeit vermuten. Damit lässt sich eine entlastende Wirkung auf die Schulterregion während der Überkopfarbeit durch den Einsatz des Paexo vermuten, was durch die weiteren Auswertungen nachzuweisen ist. Dabei sind auch die Übertragungsfunktionen kritisch zu überprüfen, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die simulierten Daten haben. Gleichzeitig weisen die simulierten und gemessenen Daten eine hohe Übereinstimmung auf, was zeigt, dass Simulationen durchaus für die angedachten Betrachtungen genutzt werden können. Eine Beurteilung der Relevanz der festgestellten Belastungsveränderungen im Schulter-, aber auch Hüftbereich ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Methodik zur Evaluation von Exoskeletten unter Nutzung des biomechanischen Menschmodells AnyBody beschrieben. Die Methodik wurde für eine definierte Überkopfarbeit eines Probanden am Beispiel der Nutzung des passiven Exoskeletts Paexo angewandt. Dabei konnten mit dem Exoskelett erste belastungsreduzierende Wirkungen insbesondere in der Schulterregion identifiziert werden. Es konnte eine wesentliche Reduktion in der Muskelaktivität, Gelenkreaktionskräfte und -momente unter Nutzung des Exoskeletts festgestellt werden. Gleichzeitig wurde auch eine Erhöhung der Gelenkmomente im Hüftbereich verzeichnet.

Im nächsten Schritt werden alle Daten der 12 Probanden statistisch ausgewertet, um relevante und signifikante Ergebnisse zu den Effekten zu quantifizieren. Weiterhin soll ein detaillierter Abgleich der gemessenen mit den virtuell bestimmten Ergebnissen vorgenommen und damit die Verlässlichkeit der Ergebnisse sowie der getroffenen Annahmen für die Simulation überprüft werden.

6. Literatur

- Benker R, Heinrich K, Brüggemann, GP (2016) Quantifizierung und Bewertung von Belastungen bei der Kabelbaummontage und Simulation einer Entlastung durch ein Unterstützungssystem. Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen, 21.
- Fritzsche L, Hölzel C, Spitzhirm M (2019) Weiterentwicklung der Kosten-Nutzen-Bewertung für Ergonomiemaßnahmen anhand von Praxisbeispielen der Automobilindustrie. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Arbeit interdisziplinär – analysieren, bewerten, gestalten. (pp. 1-6, Beitrag A.7.2). Dortmund: GfA-Press.
- Hensel R, Keil M (2018) Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 72. 10.1007/s41449-018-0122-y.
- Huysamen K, Bosch T, O'Sullivan L (2018) Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities; Applied ergonomics, July 2018, DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.009.
- Looze MP de, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW (2015) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical workload. Ergonomics, 59(5), 671–681.
- Luttmann A, Jäger M, Griefahn B, Caffier G, and Liebers F (2003) Preventing musculoskeletal disorders in the workplace, WHO.
- Marinov B (2016) Exoskeletons for industry and work, Accessed Jan 6, 2020. <https://exoskeletonreport.com/2016/04/exoskeletons-for-industry-and-work/>.
- Maurice P, Cämernik J, Gorjan D, Schirrmeyer B, Bornmann J, Tagliapietra L, Latella C, Pucci D, Fritzsche L, Ivaldi S, Babic J (2019) Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work.
- Schmalz T, Bornmann J, Schirrmeyer B, Schändlinger J, Schuler M (2019) Prinzipstudie zur Wirkung eines industriellen Exoskeletts bei Überkopfarbeit. Orthop. Tech, 70, 36-41.
- Spada S, Ghibardo L, Carnazzo C, Di Pardo M, Chander D, Gastaldi L, Cavatorta MP (2019) Physical and Virtual Assessment of a Passive Exoskeleton: Volume VIII: Ergonomics and Human Factors in Manufacturing, Agriculture, Building and Construction, Sustainable Development and Mining.
- Wittig P, Nöllenheidt C, Brenscheidt S (2012) Grundauswertung der BIBB / BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2012. mit den Schwerpunkten Arbeitsbedingungen, Arbeitsbelastungen und gesundheitliche Beschwerden, 1. Auflage. Dortmund: BAUA 2013. Seiten 62
- Zhou L, Li Y, Bai S (2017) A human-centered design optimization approach for robotic exoskeletons through biomechanical simulation. Robotics and Autonomous Systems. 91. 10.1016/j.robot.2016.12.012.

Danksagung: Dieser Beitrag entstand im Rahmen des AnDy-Forschungsprojektes, welches durch die Europäische Kommission Call H2020-ICT-2016-2017 (Förderkennzeichen: 731540) im Zeitraum von 01.01.2017.-31.12.2020 gefördert wird.



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 · www.internetkundenservice.de