

Einsatz von passiven Exoskeletten an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen und deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten

Roy STÖHR

*Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Professur für Arbeitswissenschaft, TU Dresden, D-01062 Dresden*

Kurzfassung: Die Logistikbranche verzeichnet überdurchschnittlich viele Arbeitsunfähigkeitstage. Besonders manuelle Lastenhandhabung führt zu Muskel-Skelett-Erkrankungen. Daher gilt es Prävention von gesundheitlichen Schäden durch Überbeanspruchung zu betreiben. Mit dieser Dissertation soll mittels Vergleichsstudien das Bewegungsverhalten durch den Einsatz von passiven Exoskeletten erforscht werden. In Feldstudien wird der Fragestellung nachgegangen, wie vorgegangen werden sollte, wenn Exoskelette eingesetzt werden sollen. Zudem werden die Eignung, Wirksamkeit und Grenzen verschiedener Exoskelettsysteme für die manuelle Kommissionierung bewertet. In einer Laborstudie führen Probanden unter Verwendung einer Motion Capture Technologie typische Bewegungen der Kommissioniertätigkeit aus, um Einflussfaktoren der physischen Belastung zu identifizieren. Die Exoskeletterprobung zeigt, dass ein Exoskeletteinsatz zu keiner ausreichenden Minderung einer gesundheitsgefährdenden Belastungshöhe führt. Daher müssen Unternehmen zusätzliche Gestaltungsmaßnahmen ergreifen.

Schlüsselwörter: Industrielles Exoskelett, Kommissionierung, Bewegungsverhalten, physische Belastung

1. Einleitung

Die manuelle Lastenhandhabung führt zu Muskel-Skelett-Erkrankungen und überdurchschnittlich vielen Arbeitsunfähigkeitstagen in der Logistikbranche (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2019a).

Sind technischen und organisatorischen Maßnahmen Grenzen gesetzt, rücken bspw. Exoskelette ins Blickfeld. Der Einsatz von Exoskeletten soll gesundheitlichen Schäden durch Überbeanspruchung vorbeugen.

Für die manuelle Kommissionierung sind Exoskelette zur Rumpfunterstützung relevant, da hauptsächlich die Belastungsart Heben, Halten und Tragen [HHT] vorliegt. In den Feldstudien wurden die passiven Exoskelette backX V2 und Laevo V2.5 eingesetzt.

2. Zielsetzung

Mit dem Forschungsvorhaben soll eine Handlungsanleitung entstehen, die Unternehmen bei der Planung des Einsatzes eines passiven Exoskeletts zur Rumpfunterstützung begleitet. Dazu werden Ausschlusskriterien erarbeitet, um Entscheidungen zu Ein- oder Ausschluss eines möglichen Exoskeletteinsatzes zu

stützen. Weiterhin sollen Faktoren der physischen Belastung, die durch einen Exoskeletteinsatz beeinflusst werden, identifiziert werden. Diese Einflussfaktoren und die dazu ermittelte Einflusshöhe erlauben eine vergleichende Gefährdungsbeurteilung der physischen Belastung mit und ohne Exoskeletteinsatz.

3. Vorgehensweise

Die Handlungsanleitung soll aufzeigen, wie methodisch vorgegangen werden sollte, wenn ein Exoskelett zur Reduzierung der physischen Belastung eines Mitarbeiters an einem Arbeitsplatz eingesetzt werden soll. Ein Ablaufdiagramm soll die Abfolge der einzelnen Vorgehensschritte und Entscheidungen verdeutlichen. Im ersten Schritt soll aufgezeigt werden, welche Arbeitsplatzcharakteristiken relevant sind und welche Merkmale bei der Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit mit und ohne Exoskeletteinsatz abgefragt werden. Dabei werden sicherheitstechnische Ausschlusskriterien aufgedeckt. Die Handlungsanleitung soll eine Auflistung dieser und genereller Ausschlusskriterien zum Abgleich enthalten. Im zweiten Schritt soll erklärt werden, wie die Gefährdungsbeurteilung der physischen Belastung nach den Leitmerkmalmethoden [LMM] der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAuA] (2019b) durchgeführt wird. Dabei liegt der Fokus auf der Vorstellung einer erarbeiteten Clusterung zum Zusammenfassen ähnlicher Arbeitsvorgänge. Im letzten Schritt soll die Handlungsanleitung aufzeigen, wie die sich anschließende Exoskeletterprobung mit der Beanspruchungsbefragung durchzuführen ist.

Um eine solche praxisnahe Handlungsanleitung für Unternehmen zu erarbeiten, bedarf es Feldanalysen in Partnerunternehmen. Dadurch können Beispielarbeitsplätze gemäß den Anforderungen an die Handlungsanleitung untersucht werden. Anhand der Erkenntnisse aus diesen Felduntersuchungen ist es möglich eine praxisorientierte Handlungsanleitung zu erarbeiten. Zusätzlich zu den Feldanalysen sollen durch eine standardisierte Laborstudie zur Untersuchung von Bewegungsmustern des menschlichen Körpers mittels Inertialsensormesssystem mit und ohne Exoskeletteinsatz weitere Erkenntnisse für die Handlungsanleitung abgeleitet werden. Der Vorteil der Laborstudie ist, dass sie im Gegensatz zur Beanspruchungsbefragung keinen subjektiven Einflüssen oder täglichen Auftragsschwankungen unterliegt.

In Feldstudien wird der Status quo von Kommissionierarbeitsplätzen verschiedener Partnerunternehmen der Logistikbranche aufgenommen. Dazu werden zunächst Arbeitsplatzsichtungen, Gefährdungsbeurteilungen zur Arbeitssicherheit mit und ohne Exoskelett und schließlich Gefährdungsbeurteilungen der physischen Belastung nach den LMM der BAuA (2019b) durchgeführt. Arbeitsplätze werden ausgeschlossen, wenn ein generelles oder sicherheitstechnisches Ausschlusskriterium vorliegt und nicht eliminiert werden kann. An weiterhin eingeschlossenen Arbeitsplätzen werden Exoskeletterprobungen mit Beanspruchungsbefragungen durchgeführt. Wird eine spürbare Erleichterung der Arbeit durch das Tragen eines Exosketts empfunden, ist ein Exoskeletteinsatz möglich.

Zudem werden in einer Laborstudie Bewegungsmuster des menschlichen Körpers mittels Inertialsensormesssystem mit und ohne Exoskeletteinsatz untersucht. Probanden führen typische Bewegungen der Kommissioniertätigkeit für verschiedene Picklisten und Belastungssituationen aus. Dabei handelt es sich ausschließlich um Tätigkeiten der Belastungsart HHT, da passive Exoskelette zur Rumpfunterstützung ausschließlich diese in der Kommissionierung auftretende Belastungsart unterstützen. Anhand von Bewegungsanalysen werden die Faktoren der physischen Belastung, die

durch einen Exoskeletteinsatz beeinflusst werden, sowie deren Einflusshöhe identifiziert. Die identifizierten Einflussfaktoren und Einflusshöhe werden zur Neubewertung der physischen Belastung unter Exoskeletteinsatz nach der LMM-HHT der BAuA (2019b) genutzt. Schließlich wird die Höhe der physischen Belastung mit und ohne Exoskeletteinsatz verglichen und gibt Aufschluss über die Wirkung des Exoskeletteinsatzes.

4. Ergebnisse der Feldstudien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Feldstudien zusammengefasst. Zuerst werden die erarbeiteten Ausschlusskriterien aufgezeigt. Anschließend wird auf die ermittelten physischen Belastungen und deren Hauptursachen eingegangen. Kapitel 4.3 zeigt Ergebnisse der Beanspruchungsbefragung und den daraus abgeleiteten Nutzen des Exoskeletteinsatzes. Schließlich wird in Kapitel 4.4 die Vorgehensweise der Handlungsanleitung vorgestellt, die während der Feldstudien sukzessiv entwickelt wurde.

4.1 Grenzen für den Exoskeletteinsatz bei manuellen Kommissionieraufgaben

In Tabelle 1 werden die erarbeiteten Ausschlusskriterien vorgestellt. Es wird unterschieden zwischen generellen Ausschlusskriterien und sicherheitstechnischen Ausschlusskriterien. Die Prüfung auf Ausschlusskriterien erfolgt im Rahmen der Datenerfassung zum Status quo operativer Kommissionieraufgaben (generelle Ausschlusskriterien) und der anschließenden Gefährdungsbeurteilung zur Arbeitssicherheit (sicherheitstechnische Ausschlusskriterien). Das Vorliegen eines Ausschlusskriteriums kann zum Ausschluss eines möglichen Exoskeletteinsatzes und damit Abbruch der Arbeitsplatzuntersuchung führen (vgl. Kapitel 4.4). Können jedoch Maßnahmen realisiert werden, um vorliegende Ausschlusskriterien zu eliminieren, wird die Arbeitsplatzuntersuchung fortgesetzt.

Tabelle 1: Generelle sowie sicherheitstechnische Ausschlusskriterien für einen Exoskeletteinsatz

Generelle Ausschlusskriterien	Sicherheitstechnische Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> • Organisatorische und technische Arbeitsschutzmaßnahmen sind noch nicht ausgeschöpft • Hebe-, Halte- und Tragevorgänge sind nicht vorhanden • Lasten werden überwiegend getragen oder gehalten (kaum Hebevorgänge) • Ausschließlich Lastenhandhabung von Lastgewichten < 3 kg, > 25 kg, auf gleichem Niveau der Lasten oder über Schulterniveau • Gesamtpunktwert der Leitmerkmalermethode HHT < 50 Punkte, also „grüne“ Ampelfarbe • Zusatzlast des Exoskeletts zu hoch für den Nutzer • Nutzer kann Tätigkeiten nicht ohne Exoskeletteinsatz durchführen • Ausschließlich dynamische Tätigkeiten (Kommissionierung im Vorbeigehen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stürzen, Ausrutschen, Stolpern, Umknicken, Hängenbleiben durch eingeschränkten Bewegungsfreiraum $\leq 1,5 \text{ m}^2$ • Riss- oder Schnittverletzungen an Teilen mit gefährlichen Oberflächen • Exoskelett kann von beweglichen Teilen in der Umgebung mitgerissen werden • Beim Tragen des Exoskeletts kann man an Gefahrstellen gelangen und sich dabei verletzen • Exoskelett ist nicht mit dem Arbeitsprozess kompatibel • Kombination von Exoskelett und persönlicher Schutzausrüstung beeinträchtigt sich gegenseitig in ihrer Schutzwirkung • Personen mit Exoskelett können den Fluchtweg nicht benutzen

4.2 Höhe physischer Belastungen und deren Hauptursachen

Die Gefährdungsbeurteilungen der physischen Belastung zeigen an allen der sechs untersuchten Arbeitsplätze (fünf Unternehmen) eine zumindest wesentlich erhöhte Belastung. Die Feldstudien belegen auch, dass diese physische Belastung von Arbeitern und Arbeiterinnen in der Kommissionierung hauptsächlich aus

- dem hohen Artikelgewicht,
- schlechter Körperhaltung wegen geometrische ungünstigen Bedingungen der Entnahme- und Abgabestelle (bspw. von Regal oder Palette),
- des Zeitdrucks wegen der hohen Anzahl an Kommissionierpositionen und
- dem manuellen Tragen der Artikel anstatt der Verwendung technischer Hilfsmittel

resultiert.

4.3 Nutzen eines Exoskeletteinsatzes bei manuellen Kommissionieraufgaben

Die Beanspruchungsbefragung zu Anstrengung und Misempfindung während der Exoskeletterprobung erfolgt unter Verwendung einer modifizierten Borg-Skala von Kamusella & Hoske (2018). Dabei reicht der Grad der Anstrengung bzw. Misempfindung von 0 für „nicht anstrengend“ bzw. „keine Schmerzen“ bis 4 für „sehr anstrengend“ bzw. „unerträgliche Schmerzen“. An jedem der sechs untersuchten Arbeitsplätze wurden drei Probanden analysiert. Dabei wurde die Beanspruchungsbefragung jeweils ohne Exoskeletteinsatz, mit Einsatz des Laevo V2.5 sowie des backX V2 über 405 min pro Tag durchgeführt. Abbildung 1 veranschaulicht die Summe der Anstrengung und Misempfindung der 18 Probanden während der 405 analysierten Minuten. Sowohl die summierte wahrgenommene Anstrengung als auch die summierte wahrgenommene Misempfindung der 18 Probanden ist mit beiden Exoskeletten geringer als ohne Exoskeletteinsatz.

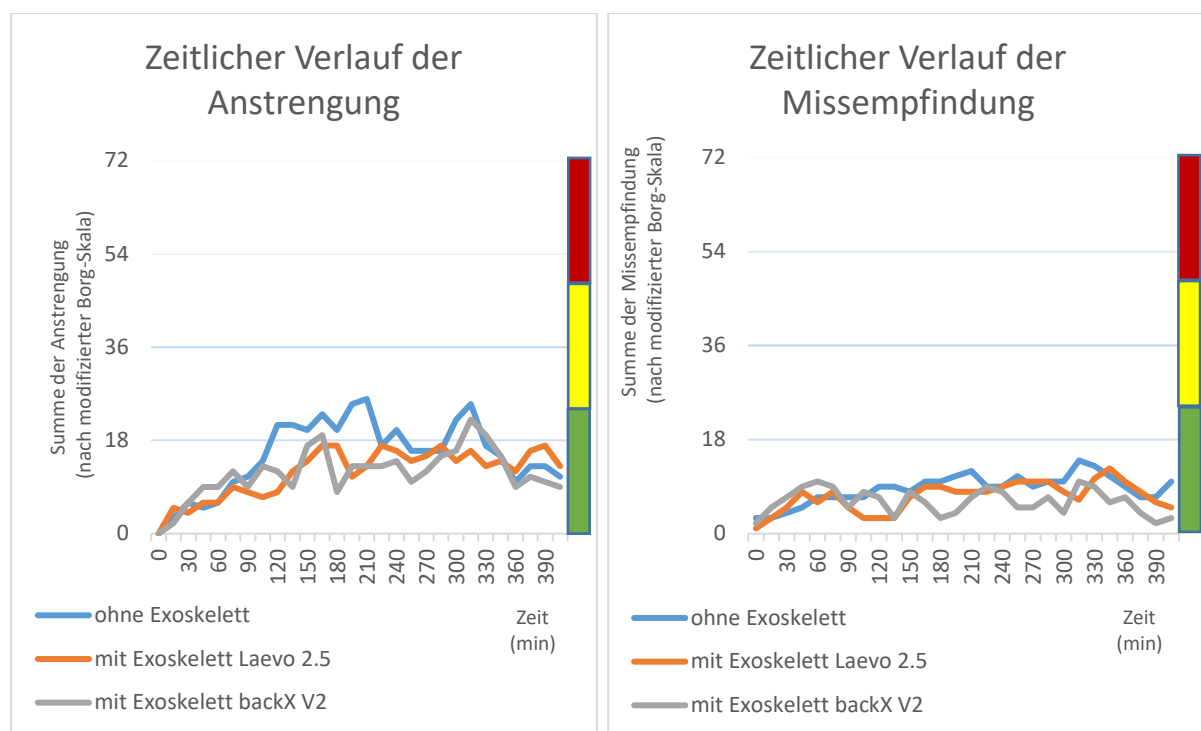


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Anstrengung und Misempfindung - Summe der 18 Probanden

Die Beanspruchungsbefragung zeigt, dass eine Verbesserung der Anstrengung und Missempfindung durch den Exoskeletteinsatz eintritt. Es zeigte sich auch, dass besonders Beschäftigte mit bereits vorhandenen physischen Beschwerden eine Stabilisierung des Muskel-Skelett-Systems empfanden.

Dahingegen zeigt eine Neubewertung der Arbeitsbelastungssituation beim Tragen eines Exoskeletts an allen sechs untersuchten Arbeitsplätzen, dass der ausschließliche Einsatz solcher Exoskelette zu keinem ausreichenden Senkungspotential führt. Die Veränderung der Punktbewertung der Tagesdosis bei Einsatz passiver rumpfunterstützender Exoskelette beim Heben, Halten und Tragen von Lasten ist nur marginal. Das Potential liegt eher in der Verbesserung der Körperhaltung, weniger in der Senkung der wirksamen Lastmasse und eher an Übergangsbereichen der Risikokategorien (Kamusella & Schmauder 2021).

4.4 Planungsgrundlage für den Exoskeletteinsatz

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 2 als zentraler Bestandteil der Handlungsanleitung zeigt abstrahiert, wie zur Arbeitsplatzuntersuchung vorgegangen werden sollte, um einen Exoskeletteinsatz zu planen und zu erproben. Dieses Vorgehen wurde während der Feldstudien entwickelt und validiert.

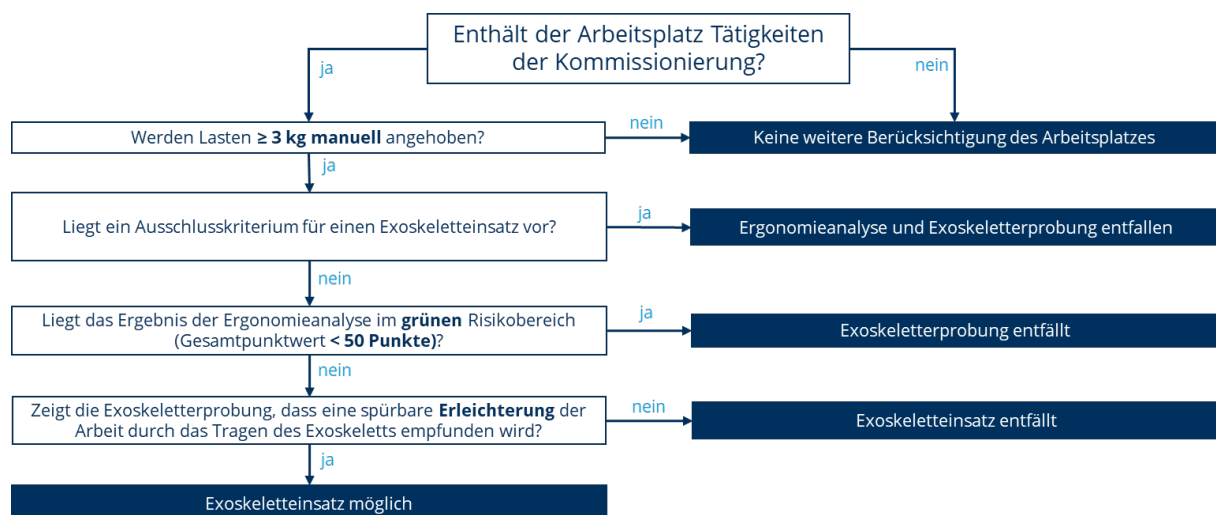


Abbildung 2: Entwickelte Vorgehensweise zur Untersuchung der Arbeitsplatzzeignung für einen möglichen Exoskeletteinsatz

Das erarbeitete Ablaufdiagramm unterstützt betriebliche Praktiker als Planungsgrundlage für den Einsatz von Exoskeletten in der Kommissionierung. Es soll die häufig geübte Praxis von Versuch und Irrtum bei der Einführung der Exoskelettnutzung durch eine systematische Vorgehensweise abgelöst werden. Bereits im Vorfeld der Nutzung soll die mögliche Entlastungswirkung abgeschätzt werden und auch mögliche Grenzen des Einsatzes sollen deutlich werden.

Die entwickelte Vorgehensweise besteht zunächst aus einer Arbeitsplatzsichtung. Arbeitsplätze kommen für einen möglichen Exoskeletteinsatz nicht in Frage, wenn u. a. Ausschlusskriterien wie bspw. nicht genügend Bewegungsfreiraum vorliegen. Zur Durchführung der Ergonomieanalyse werden die neuen LMM der BAuA (2019b) angewandt. Die anschließende Beanspruchungsbefragung dient zur Messung der Erleichterung der Arbeit durch den Exoskeletteinsatz (vgl. Kapitel 4.3).

5. Laborstudie zur Untersuchung von Bewegungsmustern des menschlichen Körpers mittels Inertialsensormesssystem mit und ohne Exoskelettanwendung

Das Ziel der Laborstudie ist es, Unterschiede des Bewegungsmusters des menschlichen Körpers mit und ohne Exoskelettanwendung zu identifizieren. Zur Konzeption der Laborstudie werden Merkmale der LMM-HHT der BAuA (2019b) herangezogen, die durch den Exoskeletteinsatz beeinflusst werden. Zur Aufnahme der Bewegungsmuster wird das Inertialsensormesssystem Xsens verwendet. Die Probanden führen unter standardisierten Bedingungen typische Bewegungen der Kommissioniertätigkeit für verschiedene Picklisten und Belastungssituationen aus, um aus den Unterschieden der Bewegungsmuster die Faktoren der physischen Belastung zu identifizieren, die durch den Exoskeletteinsatz beeinflusst werden.

Die abhängige Variable ist dabei das Bewegungsmuster (bspw. Beugewinkel des Oberkörpers). Unabhängige Variablen sind bspw. die wirksame Lastmasse, die Körperhaltung und das Exoskelett. Zur Auswertung der erhobenen Daten zu Bewegungsmustern mit und ohne Exoskelettanwendung bieten sich die Softwaretools Industrial Athlete von scalefit, ema von imk oder Microsoft Excel an.

Schließlich können mittels der LMM-HHT der BAuA (2019b) Rückschlüsse auf die physische Belastung mit und ohne Exoskelettanwendung gezogen werden. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für den Exoskeletteinsatz in Unternehmen abgeleitet und in der Handlungsanleitung ergänzt.

6. Diskussion

In den Feldstudien variiert die Auftragsmenge täglich, weshalb die physische Belastungssituation eine Aufnahme des untersuchten Arbeitstages bildet. Die Bestimmung der Beanspruchung mittels Befragung mit Borg-Skala unterliegt subjektiven Einflüssen, da verschiedene Probanden die Anstrengung und Missempfindung der verrichteten Arbeit unterschiedlich einschätzen.

Um Bewegungsmuster mit und ohne Exoskelett in der Laborstudie vergleichen zu können, muss eine Segmentierung in einzelne Bewegungssegmente vorgenommen werden. Ist die Genauigkeit der Segmentierung auf Basis von Kameraaufzeichnungen ausreichend, kann von einer aufwendigen Segmentierung auf Basis der Inertialsensoraufnahmen abgesehen werden.

7. Literatur

- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019a) Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit – Berichtsjahr 2018: Unfallverhütungsbericht Arbeit. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2020, 2. Auflage.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019b) MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2019, Band 1.
- Kamusella C, Schmauder M (2021) Exoskelette bei manuellen Kommissionieraufgaben? Sicher ist sicher 10-2021 und 11/2021, S. 475-481 und S. 526-536. Erich Schmidt Verlag.
- Kamusella C, Hoske P (2018) Studie zu Dreipunkt- und Vierpunktgurten in Baumaschinen. Ergebnisbericht für die GRAMMER AG.



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