

Bewertung von Mensch-Exoskelett-Interaktionen hinsichtlich kognitiv-motorischer Leistungsparameter

Norman RIEDEL¹, Michael HERZOG², Thorsten STEIN², Barbara DEML¹

¹ *Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation,*

Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Ring 4, 76131 Karlsruhe

² *BioMotion Center, Institut für Sport und Sportwissenschaft, Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Ring 15, 76131 Karlsruhe*

Kurzfassung: Mensch-Exoskelett-Interaktionen werden aktuell primär anhand biomechanischer und physiologischer Parameter evaluiert, wobei kognitive Parameter oft vernachlässigt werden. Dieser Beitrag präsentiert das Leistungscharakteristik-Framework als visuell-deskriptive Methode zur Bewertung von Mensch-Exoskelett-Interaktionen unter Berücksichtigung motorischer und kognitiver Leistungsparameter. Die Methode wird anhand einer Dual-Task-Laufbandstudie veranschaulicht. Fünfzehn junge Erwachsene liefen auf einem Laufband mit und ohne Gewichtsmanschetten, die beidseitig an den Ober- und Unterschenkeln angebracht waren, während sie einen visuell-verbalen Stroop-Test und eine serielle Subtraktionsaufgabe durchführten. Als Leistungsparameter wurden die korrekten Antwortraten und Variationskoeffizienten von raumzeitlichen Gangparametern erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Methode besonders zur Bewertung individueller Verhaltensweisen eignet.

Schlüsselwörter: Dual-Tasking, kognitiv-motorische Interferenz, Performance-Operating-Characteristic, Mensch-Exoskelett-Interaktion

1. Hintergrund

Exoskelette sind mechanische Strukturen, die außerhalb des menschlichen Körpers getragen werden, um Kraft und Unterstützung zu bieten. Sie werden unter anderem in der Rehabilitation oder industriellen Anwendungen eingesetzt, um die körperliche Leistungsfähigkeit zu verbessern oder zu unterstützen. Mobile Exoskelette als unterstützende Gehhilfen können aufgrund ihres eigenen Gewichts und begrenzter Bewegungsfreiheit die Körpermechanik verändern und werden zu potenziellen physischen und kognitiven Belastungen für den Benutzer, insbesondere wenn die Unterstützung unzureichend ist oder die Energieversorgung ausfällt. Bislang vorliegende Studien zur Evaluation von Exoskeletten fokussieren vor allem biomechanische und physiologische (siehe Review von Pinto-Fernandez et al. 2020) oder kognitive Effekte (Bequette et al. 2020), nicht aber die kombinierten Effekte, d. h. die kognitiv-motorischen Interferenzen (KMI).

Dual-Task-Paradigmen können verwendet werden, um die Wechselwirkung zwischen kognitiven Prozessen und der motorischen Kontrolle beim Gehen zu untersuchen (siehe Review von Al-Yahya et al. 2011). Die Bearbeitung kognitiv anspruchsvoller Aufgaben während des Gehens kann zu Interferenzen führen, die zu einer Beeinträchtigung der Leistung in einer oder beiden Aufgaben führen können. Diese KMI

können durch die Berechnung von Dual-Task Effekten (DTE) quantifiziert werden (Kelly et al. 2010). DTE stellen die Leistung beim Bearbeiten ohne zusätzliche Aufgabe in ein Verhältnis zu der Leistung mit einer zusätzlichen Aufgabe.

Neben der inferenzstatistischen Auswertung, kann zur deskriptiven Bewertung der KMI bei Dual-Task Aufgaben das Leistungscharakteristik-Framework (POC: *engl. performance operating characteristics*) verwendet werden. Das Framework wurde ursprünglich entwickelt, um zu untersuchen, ob zwei Aufgaben miteinander interferieren und wie die Leistung einer Aufgabe mit der Leistung einer anderen variiert (Sperling & Melchner 1978). Dies ermöglicht eine visuell-deskriptive Darstellung der KMI in unterschiedlichen Experimentalbedingungen. Somit können POCs einen Rahmen bieten, um zu untersuchen, wie individuelle (z. B. Alter, Pathologie), umweltbedingte (z. B. Oberflächenbedingungen) und aufgabenbezogene (z. B. Schwierigkeitsgrad der Aufgabe, Tragen von Exoskeletten) Merkmale die Leistung beim Dual-Tasking beeinflussen. Kelly et al. (2010) haben POCs beispielsweise eingesetzt, um den Einfluss von Instruktionen und der Aufgabenschwierigkeit auf die Interferenz zwischen einer kognitiven Aufgabe und dem Gehen darzustellen. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, inwiefern POCs zur Bewertung der KMI in der Mensch-Exoskelett-Interaktion eingesetzt werden können und welche Limitationen bestehen.

Zur Demonstration der Bewertungsmethode wurden Daten aus einer Dual-Task-Laufbandstudie mit Gewichtsmanschetten verwendet. Erste statistische Auswertungen wurden bereits von Riedel et al. (2023) veröffentlicht. In der Studie wird untersucht, inwieweit eine veränderte Beinmechanik die motorische und kognitive Leistung gesunder, junger Erwachsener beim Gehen beeinflusst. Gewichtsmanschetten, die beidseitig an den Ober- und Unterschenkeln angebracht sind, manipulieren die Biomechanik des Muskelskelettsystems und können somit die Komplexität der motorischen Aufgabe erhöhen. Die Hypothese war, dass das Gehen mit den Gewichten zu größeren Interferenzen und damit zu größeren Leistungsreduktionen beim Dual-Task-Gehen führt.

2. Methodik

2.1 Stichprobe

An der Studie nahmen 16 gesunde, junge Erwachsene teil. Aufgrund eines Messfehlers musste ein Proband ausgeschlossen werden, sodass die Daten von 15 Probanden ($24,3 \pm 3,5$ Jahre, $173,1 \pm 9,1$ cm, $66 \pm 10,1$ kg, 8 weiblich, 7 männlich) für die Analysen verwendet wurden. Die Probanden waren Studierende des Karlsruher Instituts für Technologie und gaben vor Durchführung der Studie eine schriftliche Einverständniserklärung ab. Die Studie wurde von der Ethikkommission des Karlsruher Instituts für Technologie genehmigt.

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Probanden gingen auf einem Laufband (h/p/cosmos Saturn) mit ihrer bevorzugten Ganggeschwindigkeit, wobei Gewichte (je 2,25 kg) an ihren Ober- und Unterschenkeln befestigt waren (siehe Abbildung 1). Währenddessen bearbeiteten sie einen visuell-verbalen Stroop-Test oder eine Subtraktionsaufgabe (serielle Subtraktion der Zahl Sieben von einer dreistelligen Ziffer). Die aktuelle Aufgabe und die Stimuli

wurden auf einem 65-Zoll-Monitor vor dem Laufband dargestellt. Erfasst wurden Ganzkörperbewegungen mittels eines Infrarot-Kamerasystems (Vicon Motion Systems, 200 Hz, Ganzkörper-Markerset mit 56 Markern), die Audiospur während der Bearbeitung der Nebenaufgaben und die wahrgenommene mentale und körperliche Beanspruchung anhand der Subskalen des NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988).

Zur Eingewöhnung führten die Probanden jede Nebenaufgabe zunächst 80 Sekunden lang im Sitzen durch. Anschließend gingen sie sechs Minuten auf dem Laufband, bevor die bevorzugte Ganggeschwindigkeit ermittelt wurde. Die ermittelte Geschwindigkeit wurde für alle Experimentalbedingungen konstant gehalten.

Es wurde ein Durchgang mit und einer ohne die Gewichtsmanschetten durchgeführt. Beide Durchgänge erfolgten in randomisierter Reihenfolge und dauerten jeweils 12 Minuten. Die Durchgänge begannen mit einem sechsminütigen Block ohne Nebenaufgabe zur Kontrolle von Adaptationsprozessen. Danach folgte der erste Dual-Task-Block für eine Minute. Um kognitiver Ermüdung entgegenzuwirken, folgte ein zweiminütiger Block ohne Nebenaufgabe, bevor der zweite Dual-Task-Block für eine Minute durchgeführt wurde. Die Durchgänge endeten mit einem weiteren zweiminütigen Block ohne Nebenaufgabe. Die Reihenfolge des Auftretens der beiden Nebenaufgaben wurde randomisiert. Es wurden keine spezifischen Instruktionen gegeben, welche Aufgabe während des Dual-Task-Gehens priorisiert werden sollte. Nach dem Durchgang mit Gewichtsmanschetten folgte ein zusätzlicher Durchgang von 18 Minuten, der für die Untersuchung von (Re-)Adaptationsprozessen genutzt wurde. Dieser Durchgang ist für diesen Beitrag allerdings nicht relevant. Nach den Durchgängen wurden die Nebenaufgaben erneut im Sitzen ausgeführt und dienten als Kontrollbedingungen für die Berechnung der Dual-Task Effekte.

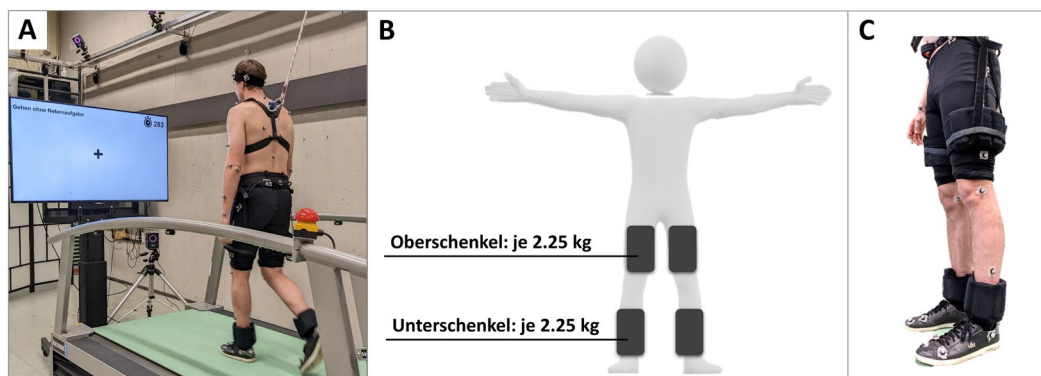


Abbildung 1: A) Darstellung des Versuchsaufbaus, B) Illustration der Anbringung der Gewichtsmanschetten an den Beinen, C) Darstellung der Anbringung der Gewichtsmanschetten bei einem Probanden. Angepasst nach Riedel et al. (2023).

2.3. Datenverarbeitung

Die Bewegungsdaten wurden zunächst in Vicon Nexus 2.14.0 und Matlab R2023a (The MathWorks) nachbearbeitet und gefiltert (Butterworth low-pass Filter, 4. Ordnung, 6 Hz). Anschließend wurden anhand von 30 Gangzyklen in jeder Experimentalbedingung die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der raumzeitlichen Gangparameter Schrittlänge, Spurbreite, Doppelschrittdauer und Doppelstützphasendauer berechnet. Die Schritt-für-Schritt-Variabilität gilt als Indikator für die Qualität der Gangbewegung (Hausdorff 2005). Folglich wurde angenommen, dass eine höhere Variabilität eine Leistungsreduktion bedeutet. Zur Bestimmung der Dual-Task-Effekte (DTE)

für jeden Parameter wurden die Variationskoeffizienten beim Gehen ohne Nebenaufgabe in ein Verhältnis zum Gehen mit Nebenaufgabe gesetzt. Die DTE wurden sowohl für das Gehen mit als auch ohne Gewicht berechnet:

$$DTE = - \frac{(Parameter_{dual\ task} - Parameter_{single\ task})}{Parameter_{single\ task}} \times 100\ %$$

Die DTE der einzelnen Gangparameter wurden zusammengefasst und gemittelt, so dass ein einzelner Wert als motorische DTE resultierte.

Die kognitive Leistung wurde für jede Experimentalbedingung anhand der korrekten Antwortrate in den Nebenaufgaben bestimmt (Produkt aus Antworten pro Sekunde und Prozent korrekter Antworten) und entsprechend die kognitiven DTE berechnet. Es wurde dazu die Antwortrate beim Gehen (mit bzw. ohne Gewichte) in ein Verhältnis mit der Antwortrate im Sitzen gesetzt. Das Minuszeichen in der Formel entfällt in diesem Fall, da eine höhere Antwortrate auch eine Leistungssteigerung bedeutet. Negative DTE repräsentieren entsprechend eine Reduktion der Leistung unter Dual-Task Bedingungen. Zur Erstellung der Leistungscharakteristik (POC) wurden die kognitiven DTE und die motorischen DTE gegeneinander geplottet.

3. Ergebnisse

Die berechneten kognitiven und motorischen DTE der einzelnen Probanden in den vier Dual-Task-Experimentalbedingungen sind in der POC in Abbildung 2A dargestellt. Die mittleren Ausprägungen der DTE sind in Abbildung 2B dargestellt.

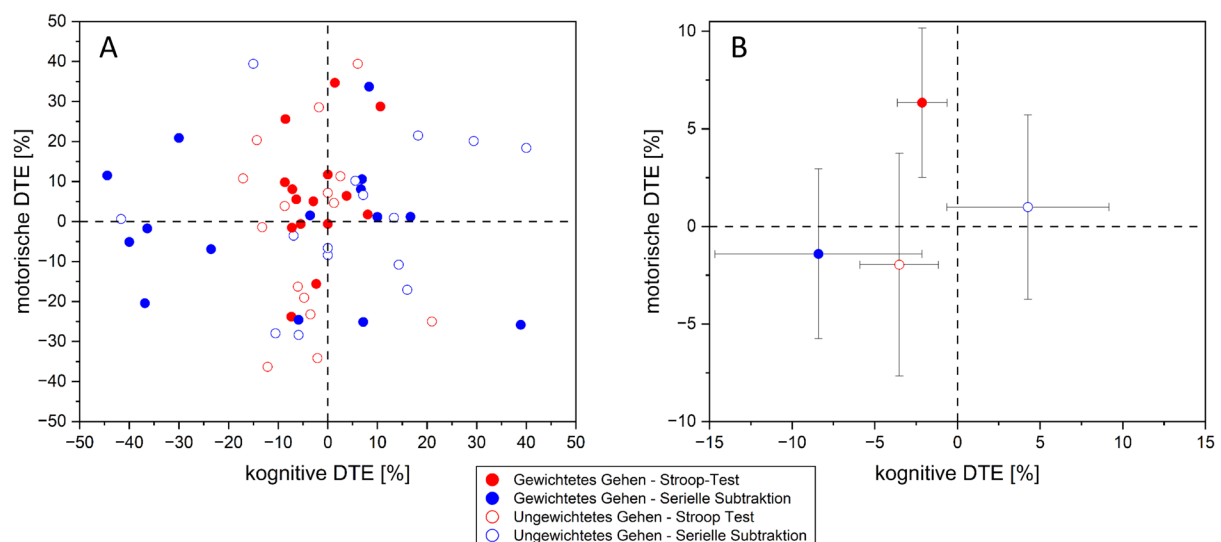


Abbildung 2: Leistungscharakteristik (POC) zur Darstellung des Einflusses der Gewichte und der Nebenaufgaben auf die kognitive und motorische Leistung. A) Darstellung der individuellen ($n=15$) Leistungscharakteristik. B) Darstellung der mittleren Leistungscharakteristik. Fehlerbalken repräsentieren Standardfehler. DTE = Dual-Task Effekte.

Die mittleren motorischen DTE beim gewichteten Gehen während des Stroop-Tests weisen leicht erhöhte positive Werte auf ($M = 6.3\ %$, $SD = 14.8\ %$), was bedeutet, dass die Schritt-für-Schritt-Variabilität im Vergleich zum Gehen ohne Nebenaufgabe etwas

geringer ist. Die mittleren kognitiven DTE sind nur minimal negativ ($M = -2.1 \%$, $SD = 5.9 \%$). Im Vergleich dazu sind die motorischen DTE beim gewichteten Gehen während der Subtraktionsaufgabe minimal negativ ($M = -1.4 \%$, $SD = 16.8 \%$). Die kognitiven DTE weisen im Schnitt allerdings erhöhte negative Werte auf ($M = -8.4 \%$, $SD = 24.2 \%$). Es wurden entsprechend weniger korrekte Berechnungen pro Minute während des gewichteten Gehens durchgeführt als im Sitzen.

Beim ungewichteten Gehen während des Stroop-Tests wurden leicht negative motorische DTE ($M = -2.0 \%$, $SD = 22.1 \%$) und leicht negative kognitive DTE ($M = -3.5 \%$, $SD = 9.2 \%$) beobachtet. Während der Subtraktionsaufgabe konnten leicht positive motorische DTE ($M = 1.0 \%$, $SD = 18.3 \%$) und leicht positive kognitive DTE ($M = 4.3 \%$, $SD = 19.0 \%$) festgestellt werden.

4. Diskussion und Ausblick

Dieser Beitrag präsentiert das Leistungscharakteristik-Framework (POC) als visuell-deskriptive Bewertungsmethode zur Anwendung im Kontext der Mensch-Exoskelett-Interaktion. POCs wurden entwickelt, um zu untersuchen, ob sich zwei Aufgaben gegenseitig beeinflussen und wie sich die Leistung einer Aufgabe in Abhängigkeit von der Leistung einer anderen verändert. Hier wurden POCs verwendet, um festzustellen, wie sich die motorische und kognitive Leistung in Abhängigkeit von einer veränderten Beinmechanik und einer kognitiv beanspruchenden Nebenaufgabe verändert.

Die motorische und kognitive Leistung wird sowohl vom Gewichtungsfaktor (motorischer Faktor) als auch von der Nebenaufgabe (kognitiver Faktor) beeinflusst, jedoch ohne eindeutige Muster. Die hohen Standardabweichungen weisen auf hoch individuelle Reaktionen auf die Experimentalfaktoren hin. Vergleichbare Beobachtungen machten Bequette et al. (2020) in einer Exoskelett-Studie und betonten, dass im Kontext der Mensch-Exoskelett-Interaktion nicht nur Gruppenmittelwerte, sondern insbesondere das individuelle Verhalten untersucht werden sollte. In diesem Zusammenhang stellen POCs eine vielversprechende Methode dar, individuelle Leistungsveränderungen zu bewerten, zum Beispiel in Trainings- oder Rehabilitationsprogrammen.

Das Fehlen eines eindeutigen Musters könnte auch durch das Dual-Process-Modell (Huxhold et al. 2006) erklärt werden, das aufzeigt, dass einfache Nebenaufgaben einen externalen Aufmerksamkeitsfokus fördern, während komplexe Aufgaben zu einem Wettbewerb um Aufmerksamkeitsressourcen führen. Die Subtraktionsaufgabe wurde von den Probanden als signifikant beanspruchender bewertet als der Stroop-Test (Riedel et al. 2023). In der anspruchsvollsten Dual-Task-Bedingung (gewichtetes Gehen mit der Subtraktions-Aufgabe) scheinen die Aufmerksamkeitsressourcen erschöpft zu sein, wobei die Priorisierung der Posture-First-Strategie (Shumway-Cook et al. 1997) zur Aufrechterhaltung eines stabilen Gangs beobachtet wurde. Dies scheint zu einer Leistungsreduktion bei der Bearbeitung der Subtraktionsaufgabe geführt zu haben. Im Gegensatz dazu lenkte der als weniger anspruchsvoll bewertete Stroop-Test den Aufmerksamkeitsfokus weg von der Gangbewegung beim gewichteten Gehen (externer Fokus), was zu einer Verringerung der Schritt-für-Schritt Variabilität im Vergleich zum Single-Task-Gehen führte (siehe Abbildung 2B). Beim ungewichteten Gehen scheint die Externalisierung des Aufmerksamkeitsfokus keinen Einfluss zu haben, da die DTE nur minimal sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Interpretation der Leistungscharakteristik nicht trivial ist und zum Beispiel von der Art der Nebenaufgabe abhängt. Auch die Wahl der

Biomarker zur Bewertung der motorischen Leistung ist essenziell für die Aussagekraft der POCs. Neben der hier verwendeten Schritt-für-Schritt Variabilität von raumzeitlichen Gangparametern, sollten weitere Biomarker untersucht werden. Ein Standard ist notwendig, um die Vergleichbarkeit zwischen Studien zu gewährleisten. Dies kann beispielsweise den Vergleich des Einflusses unterschiedlicher exoskelettaler Systeme auf Motorik und Kognition ermöglichen.

POCs stellen eine vielversprechende Bewertungsmethode im Kontext der Mensch-Exoskelett-Interaktion dar. Durch die Berücksichtigung motorischer und kognitiver Leistungsparameter wird eine mensch-zentrierte Evaluation der Interaktion fokussiert. Eine Standardisierung und die Definition von geeigneten Biomarkern zur Bewertung der motorischen Leistung ist notwendig, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Aufgrund sehr individueller Verhaltensweisen eignen sich POCs vor allem auf subjektspezifischer Ebene für die Bewertung individueller Leistungscharakteristika.

5. Literatur

- Al-Yahya E, Dawes H, Smith L, Dennis A, Howells K & Cockburn J. (2011). Cognitive motor interference while walking: a systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 35(3), 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>
- Bequette B, Norton A, Jones E & Stirling L (2020). Physical and Cognitive Load Effects Due to a Powered Lower-Body Exoskeleton. *Human factors*, 62(3), 411–423. <https://doi.org/10.1177/0018720820907450>
- Hart SG & Staveland LE (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology. Human Mental Workload* (Bd. 52, S. 139–183). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hausdorff JM (2005). Gait variability: methods, modeling and meaning. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2, 19. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-19>
- Huxhold O, Li S-C, Schmiedek F & Lindenberger U (2006). Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain research bulletin*, 69(3), 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.01.002>
- Kelly VE, Janke AA & Shumway-Cook A [Anne] (2010). Effects of instructed focus and task difficulty on concurrent walking and cognitive task performance in healthy young adults. *Experimental brain research*, 207(1–2), 65–73. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2429-6>
- Pinto-Fernandez D, Torricelli D, Del Sanchez-Villamanan MC, Aller F, Mombaur K, Conti R, Vitiello N, Moreno JC & Pons JL (2020). Performance Evaluation of Lower Limb Exoskeletons: A Systematic Review. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 28(7), 1573–1583. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2989481>
- Riedel N, Herzog M, Stein T & Deml B (2023). Effects of modified leg mechanics on cognitive performance and workload during dual-task walking. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2023 Annual Conference*, 197–211.
- Shumway-Cook A[A], Woollacott M, Kerns KA & Baldwin M (1997). The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*, 52(4), M232-40. <https://doi.org/10.1093/gerona/52A.4.M232>
- Sperling G & Melchner MJ (1978). The attention operating characteristic: examples from visual search. *Science (New York, N.Y.)*, 202(4365), 315–318. <https://doi.org/10.1126/science.694536>

Danksagung: Die Forschungsarbeit wurde durch das JuBot-Projekt unterstützt, welches von der Carl-Zeiss-Stiftung gefördert wird.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

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

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de