

## **Vergleich der Unterstützungswirkung verschiedener rückenunterstützender Exoskelette beim Heben und Halten von Lasten**

Jasper JOHNS<sup>1,2</sup>, Inga SCHULTES<sup>1</sup>, Kai HEINRICH<sup>1</sup>, Wolfgang POTTHAST<sup>2</sup>,  
Ulrich GLITSCH<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Arbeitsschutz, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung,  
Alte Heerstr. 111, D-53757 Sankt Augustin*

<sup>2</sup> *Institut für Biomechanik und Orthopädie, Deutsche Sporthochschule Köln,  
Am Sportpark Müngersdorf 6, D-50933 Köln*

**Kurzfassung:** Der Einsatz von Exoskeletten an industriellen Arbeitsplätzen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Bei der Beurteilung von Exoskeletten spielt die Entlastungswirkung eine entscheidende Rolle, die bisher nicht vollständig erforscht ist. In dieser Untersuchung werden daher die Effekte der Unterstützung von einem aktiven und zwei passiven rückenunterstützenden Exoskeletten auf die biomechanische Belastung des Rückens analysiert. In dieser Laborstudie haben 12 Probanden dynamisches Heben und statisches Halten von 10 kg ohne und mit den verschiedenen Exoskeletten durchgeführt. Die Analyse der muskulären Aktivität der Rückenstrecker und lumbalen Kompressionskräfte hat gezeigt, dass alle Systeme die Wirbelsäulenbelastung reduzieren konnten. Zwischen den passiven Exoskeletten wurden dabei tätigkeitsunabhängige Unterschiede gefunden, die auf die verschiedene Drehmomentunterstützung der Systeme zurückgeführt werden konnten. Für das aktive System wurden größere Unterschiede zwischen der dynamischen und statischen Tätigkeit beobachtet. Dies konnte mit einer Latenz der aktiven Steuereinheit für die gewählten Unterstützungseinstellungen erklärt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die gezielte Auswahl spezieller Exoskelette für bestimmte Tätigkeiten eine große Rolle in der Untersuchung und Einführung der Systeme spielen sollte.

**Schlüsselwörter:** Exoskelett, EMG, Kompressionskräfte, L5/S1, Bewegungsanalyse, Biomechanik

### **1. Einleitung**

In den letzten Jahren ist die Anzahl der kommerziell verfügbaren industriellen Exoskelette um ein Vielfaches gestiegen. Die Systeme wurden zur mechanischen Unterstützung von Personen bei der Durchführung physisch belastender Tätigkeiten entwickelt. Rückenunterstützende Systeme im Speziellen, zielen darauf ab, durch ein unterstützendes, externes Extensionsmoment, das Aufrichten des Oberkörpers aus einer vorgebeugten Position zu erleichtern und dabei die lumbale Wirbelsäule zu entlasten. Für diverse verfügbare Systeme konnten wissenschaftliche Studien schon eine generelle Wirksamkeit bei der Reduktion körperlicher Belastungen nachweisen (Kermavnar et al. 2021). Die meisten durchgeführten Untersuchungen haben sich dabei entweder auf den Effekt der Unterstützung auf die Muskelaktivität konzentriert

(Luger et al. 2021; Reimeir et al. 2023) oder einzelne Exoskelette umfangreich analysiert (Glitsch et al. 2020; Koopman et al. 2020; Park et al. 2022). Das Ziel der aktuellen Studie war es daher, mehrere Exoskelette (ein aktives, A1, und zwei passive, P1 und P2) in die Untersuchung einzubeziehen und ihren Effekt beim Heben und Halten von 10 kg auf modellierte Bandscheibenkompressionskräfte und die Aktivität der rückenstreckenden Muskulatur zu betrachten. Es wurde erwartet, dass für passive Systeme eine verschiedene, aber tätigkeitsunabhängige Unterstützungswirkung beobachtet werden kann. Für das aktive System wurde ein größerer Einfluss der Tätigkeit auf die Unterstützung erwartet.

## 2. Methoden

Im Rahmen einer Laborstudie wurden kinematische Daten und die Aktivität der Rückenmuskulatur von 12 Probanden (6 m, 6 w; Größe:  $1.77 \pm 0.08$  m; Gewicht:  $70.0 \pm 11.4$  kg; Alter:  $25 \pm 2$  Jahre) beim dynamischen Heben (5 Wiederholungen gerades Heben vor dem Körper, freie Technik) und statischen Halten (20s in  $45^\circ$  Rumpfvorneigung mit gestreckten Beinen) eines 10 kg schweren Lastgewichts erhoben. Die Tätigkeiten wurden mehrfach absolviert und die Probanden trugen dabei in zufälliger Reihenfolge kein Exoskelett und die Systeme A1 (aktiv, CrayX Gen. 4, German Bionic, Augsburg, Deutschland), P1 (passiv, Laevo V2.57, Laevo, Delft, Niederlande) und P2 (passiv, BackX, SuitX, Emeryville, USA).

Reflektierende Marker wurden nach dem Plug-in Gait Standard (Vicon Motion Systems Limited 2023) am gesamten Körper der Probanden angebracht und die kinematischen Daten mit einem Motion-Capture System (Vicon Motion Systems Limited, Oxford, GB) aufgezeichnet. Für die Ableitung der muskulären Aktivität wurden beidseitig der Wirbelsäule Elektroden auf dem M erector spinae in Höhe der Wirbel T11/12 und L2/3 angebracht.

Die Signale der Muskulatur wurden mit 1000Hz aufgezeichnet, gleichgerichtet, bandpass-gefiltert (25 – 450 Hz) und geglättet (100 ms RMS-Fenster). Zur Berechnung der Lendenwirbelbelastung (L5/S1) wurde ein invers-dynamischer Top-down-Modellierungsansatz verwendet. Aus dem an diesem Gelenk resultierenden Flexions-Extensionsmoment, bestehend aus den Anteilen der Probanden, Exoskelette und des Lastgewichts, wurde über das Modell von Jäger (2023) die wirkende Kompressionskraft zwischen den Wirbelsäulensegmenten L5 und S1 berechnet. Die Exoskelettunterstützung wurde dabei als externe Kontaktkraft senkrecht zum Brustpolster der Exoskelette in das Modell eingebracht. Für die passiven Systeme wurde diese Unterstützung im Vorhinein experimentell als beugungswinkelabhängige Drehmomentkennlinie bestimmt (Johns et al. 2021). Das Exoskelett A1 verfügte über verschiedene Einstellmöglichkeiten, die entsprechend der jeweiligen Tätigkeit und Probanden angepasst wurden. Die Daten eines internen Drehmomentsensors aus der Motorsteuerung konnten ausgelesen werden, um die Unterstützung durch das System zu erfassen.

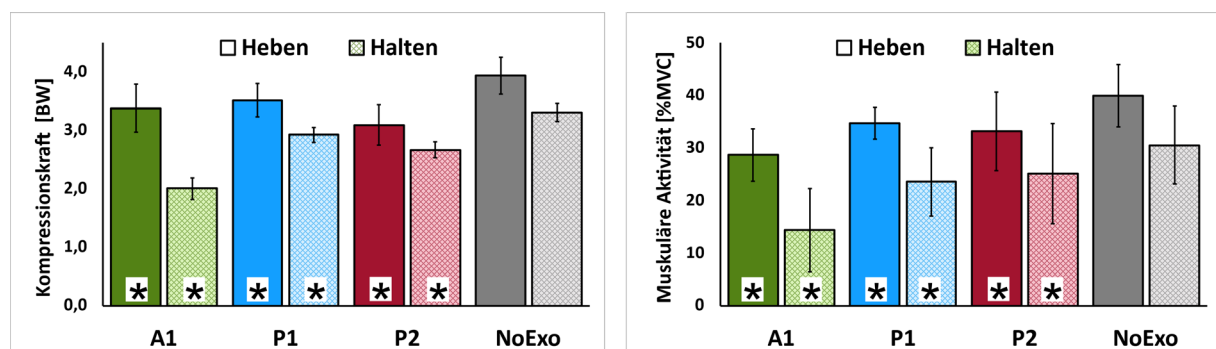
Für die dynamische Hebetätigkeit wurden die Maxima der berechneten Bandscheibenkompressionskräfte (normalisiert auf das Körpergewicht [BW]) und gemessenen Muskelaktivierung (normalisiert auf die maximale willkürliche Kontraktion [%MVC]) im Intervall zwischen Anheben des Gewichts und aufrechtem Stand berücksichtigt. Beim statischen Halten wurden jeweils die Mittelwerte über das 20-sekündige Intervall ausgewertet. Die verschiedenen Bedingungen und Variablen wurden in separaten

Varianzanalysen mit Messwiederholung (repeated measures ANOVA) und anschließenden Paarvergleichen mit post-hoc t-Tests statistisch analysiert.

### 3. Ergebnisse

Bei der dynamischen Hebeaufgabe lagen die maximalen lumbalen Kompressionsbelastungen ohne Exoskelett bei  $3,94 \pm 0,32$  BW. Die Analyse der EMG-Daten zeigte hier Spitzen in der muskulären Aktivität von  $39,9 \pm 9,5$  %MVC. Die Exoskelette A1 und P1 führten zu einer Verringerung der maximalen Kompressionskräfte in der lumbalen Wirbelsäule um 15 % ( $p < 0,01$ ) bzw. 11 % ( $p < 0,01$ ) im Vergleich zur Situation ohne Exoskelett, während für P2 eine Verringerung um 22 % ( $p < 0,01$ ) beobachtet wurde. Die maximale Muskelaktivität beim Heben wurde ebenfalls durch alle Systeme signifikant reduziert (A1: 32 %; P1: 13 %; P2: 17 %,  $p < 0,01$ ).

Bei der Halteaufgabe wurden ohne Exoskelett L5/S1 Kompressionskräfte von im Mittel  $3,25 \pm 0,29$  BW und eine mittlere muskuläre Aktivität von  $20,9 \pm 4,9$  %MVC gefunden. Hier wurden für beide passiven Systeme vergleichbare Reduzierungen der lumbalen Kompressionskräfte wie beim Heben von 12 % ( $p < 0,01$ ) für P1 und 20 % ( $p < 0,01$ ) für P2 gefunden. Für A1 wurde eine größere Reduzierung von 41 % ( $p < 0,01$ ) gefunden. Die Daten zur Muskelaktivierung zeigten ein ähnliches Muster mit einer Verringerung der mittleren EMG-Amplitude für P1 um 23 % ( $p < 0,01$ ) und P2 um 16 % ( $p < 0,01$ ) sowie einer größeren Entlastung durch A1 von 54 % ( $p < 0,01$ ).



**Abbildung 1:** L5/S1 Kompressionskräfte (links) und muskuläre Aktivität des M. erector spinae (rechts) während des dynamischen Hebens und Haltens von 10 kg. \*- signifikanter Unterschied zu NoExo mit  $p < 0,01$ . Fehlerbalken geben  $\pm 1$  Standardabweichung an.

### 4. Diskussion

Das Ziel dieser Studie war es, die Unterstützungseffekte verschiedener Exoskelette beim dynamischen Heben und statischen Halten zu untersuchen. Für beide passiven Exoskelette konnten, wie erwartet, unterschiedliche, aber tätigkeitsunabhängige Reduktionen in den jeweiligen Belastungsgrößen gefunden werden. Dies passt zu den Ergebnissen von Madinei et al. (2022), die zwar eindeutige Unterschiede zwischen den passiven Exoskeletten P1 und P2, jedoch keinen Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Drehmomentunterstützung finden konnten. Die gefundenen

Unterschiede in der Belastungsreduzierung zwischen P1 und P2 konnten entsprechend weitestgehend auf Unterschiede in den Unterstützungsdrehmomenten (P1 max.: 26Nm; P2 max.: 54Nm) zurückgeführt werden.

Das Exoskelett A1 zeigte deutlich größere Unterschiede zwischen der statischen und dynamischen Tätigkeit. Eine vertiefende Auswertung der erzeugten Unterstützung konnte zeigen, dass, obwohl das System die insgesamt höchste Unterstützung (ca. 70Nm) erzeugen konnte, diese Spitze erst im letzten Drittel der Extensionsphase beim Heben erreicht wurde. Die gewählten Systemeinstellungen scheinen hier, in der dynamischen Bedingung, eine gewisse Ansprechlatenz der Steuereinheit zur Folge zu haben, welche jedoch während des längeren statischen Haltens vernachlässigbar wird.

Während alle Exoskelette die Belastung der lumbalen Wirbelsäule signifikant reduzieren konnten, legen die gefundenen Ergebnisse nahe, dass die gezielte Auswahl von spezifischen Exoskeletten für bestimmten Tätigkeiten ein entscheidender Schritt bei der Einführung und Untersuchung von industriellen Exoskeletten ist.

## 5. Literatur

- Glitsch U, Bäuerle I, Hertrich L, Heinrich K, Liedtke M 2020. Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletten für den industriellen Einsatz. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 74, 294–305.
- Jäger M 2023. The Dortmund Lumbar Load Atlas. Springer.
- Johns J, Heinrich K, Glitsch U, Year Biomechanische Analyse der Unterstützungswirkung von rumpfunterstützenden Exoskeletten bei manueller Lasthandhabung. Beitrag A.1.11. In 67. GfA-Frühjahrskongress – Arbeit HUMAINE gestalten, 03. - 05.03.2021, Bochum.
- Kermavnar T, de Vries AW, de Looze MP, O'Sullivan LW 2021. Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: an updated systematic review. Ergonomics 64, 685–711.
- Koopman AS, Kingma I, de Looze MP, van Dieen JH, 2020. Effects of a passive back exoskeleton on the mechanical loading of the low-back during symmetric lifting. J Biomech 102, 109486.
- Luger T, Bär M, Seibt R, Rimmel P, Rieger MA, Steinhilber B, 2021. A passive back exoskeleton supporting symmetric and asymmetric lifting in stoop and squat posture reduces trunk and hip extensor muscle activity and adjusts body posture – A laboratory study. Applied Ergonomics 97, 103530-103530.
- Madinei S, Kim S, Park JH, Srinivasan D, Nussbaum MA 2022. A novel approach to quantify the assistive torque profiles generated by passive back-support exoskeletons. J Biomech 145, 111363.
- Park JH, Lee Y, Madinei S, Kim S, Nussbaum MA, Srinivasan D 2022. Effects of Back-Support Exoskeleton Use on Lower Limb Joint Kinematics and Kinetics During Level Walking. Ann Biomed Eng 50, 964-977.
- Reimeir B, Calisti M, Mittermeier R, Ralfs L, Weidner R 2023. Effects of back-support exoskeletons with different functional mechanisms on trunk muscle activity and kinematics. Wearable Technologies 4.
- Vicon Motion Systems Limited. 2023. Plug-in Gait Reference Guide. Retrieved from <https://docs.vicon.com/display/Nexus215/PDF+downloads+for+Vicon+Nexus?preview=/182616603/182616780/Plug-in%20Gait%20Reference%20Guide.pdf>



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](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

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