

Ergebnisse der Laborstudien zur Untersuchung des Einflusses von passiven rumpfunterstützenden Exoskeletten bei typischen Haupt- und Nebentätigkeiten der Kommissionierung

Carolin KREIL, Svetlana WÄHNERT

*Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Professur für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Dresden,
Dürerstraße 26, D-01062 Dresden*

Kurzfassung: Manuelle Kommissioniertätigkeiten sind von hohen physischen Belastungen vor allem in Form von Lastenhandhabung geprägt. In Zeiten von Fachkräftemangel suchen Unternehmen nach Technologien, die ihre Mitarbeiter entlasten. Ein vorstellbarer Lösungsansatz sind Exoskelette. An der Professur für Arbeitswissenschaft der TU Dresden wurden Laborstudien durchgeführt, um den Einfluss von Exoskeletten auf die Effizienz bei typischen Haupt- und Nebentätigkeiten der Kommissionierung zu erfassen. Für die Untersuchungen kamen zwei passive rumpfunterstützende Exoskelette zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz der getesteten Exoskelette die Dauer der untersuchten Haupttätigkeit sowie die Dauern für die Nebentätigkeiten Körperfortbewegung und Bücken signifikant erhöht werden.

Schlüsselwörter: passive Exoskelette, Kommissionierleistung, manuelle Kommissionierung, Lastenhandhabung, Haupttätigkeiten, Nebentätigkeiten

1. Einleitung

In vielen Bereichen der Industrie sind körperliche Beanspruchungen, wie sie beispielsweise durch ungünstige Körperhaltung oder das Heben, Halten und Tragen schwerer Lasten entstehen, nach wie vor eine der bedeutendsten Ursachen gesundheitlicher Risiken für Arbeitnehmer. Infolge dieser physischen Belastungen kommt es unter den Beschäftigten vermehrt zu Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE). Laut Fehlzeiten-Report 2023 konnten im Jahr 2022 17,4 % der Arbeitsunfähigkeitstage aller Beschäftigten auf MSE zurückgeführt werden (Meyer et al. 2023). Damit sind MSE nach den Atemwegsinfektionen die zweithäufigste Ursache für Arbeitsunfähigkeit in Deutschland. Um diesem Trend entgegenzuwirken, setzen viele Unternehmen Hoffnungen auf den Einsatz von Exoskeletten. *Exoskelette* werden im Allgemeinen als am Körper getragene externe mechanische Strukturen bezeichnet und lassen sich je nach Einsatzgebiet und Funktionsweise weiter unterscheiden (De Looze et al. 2016). Der Einsatz der Exoskelette erfolgt dabei immer mit dem Ziel die begrenzte Leistungsfähigkeit des Menschen zu steigern. Exoskelette können u. a. unterschieden werden in aktive und passive Exoskelette. Hauptunterscheidungskriterium ist hierbei die Energiezufuhr. *Aktive Exoskelette* besitzen eine direkte Energiezufuhr, z. B. über Akkus oder eine direkte Verbindung mit dem Stromnetz. *Passive Exoskelette* verfügen

über keine Energiezufuhr, sie nutzen z. B. die Spannkraft von Federn, um die menschliche Bewegung zu unterstützen. Durch das gestiegene Interesse an Exoskeletten hat auch die Forschung in den letzten beiden Jahrzehnten enorm an Zuwachs gewonnen. Aktuelle Studien zum Exoskeletteinsatz konzentrieren sich z. B. auf biomechanische (Glitsch et al., 2020), kinematische und physiologische Effekte (Van Engelhoven et al. 2018) sowie auf Aspekte der Arbeitssicherheit und Nutzerakzeptanz (Hensel et al. 2018).

Da vor allem die Tätigkeiten in der operativen Logistik, d. h. der manuellen Handhabung von Lasten (u. a. Kommissionierung), von hohen physischen Belastungsanteilen geprägt sind, befassen sich mittlerweile zahlreiche Studien zunehmend auch mit dem Einsatz von Exoskeletten im Bereich der Logistik. Winter et al. (2020) testeten z. B. passive Exoskelette im Logistik- und Transportgewerbe. Erfasst wurden u. a. sicherheitsrelevante Risiken in Abhängigkeit des Arbeitsumfeldes, Tragekomfort, subjektives Belastungsempfinden und kinematische Kenngrößen. Alle acht getesteten Versuchspersonen eines Betriebes bestätigten ein subjektives Empfinden der Entlastung, fünf Versuchspersonen beklagten Diskomfort beim Tragen des Exoskeletts in den Regionen Brust und Oberschenkel. Es konnte außerdem ein Entlastungseffekt durch den Einsatz eines Exoskeletts nachgewiesen werden, dieser ist aber anhand der gemessenen Muskelaktivität als moderat einzuschätzen. Auch Schulz et al. (2020) untersuchten u. a. Aufgabenbeanspruchung und Tragekomfort passiver Exoskelette in der Intralogistik. Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie war, dass mit einem Exoskeletteinsatz das Risiko verbunden ist, die innerbetrieblichen Prozessabläufe zu behindern. Durch das Tragen des Assistenzsystems werden die Körperumfänge vergrößert und einige Tätigkeiten (z. B. Bedienung eines Flurförderzeugs) können nicht wie gewohnt absolviert werden. Außerdem kommt auch diese Studie zu dem Ergebnis, dass der Tragekomfort durch Druck auf den Oberschenkel- und Brustbereich eingeschränkt ist.

Zunehmend von größerem Interesse ist die Auswirkung von Exoskeletten auf die Leistungsfähigkeit des Menschen, da die Effizienz der Arbeitsabläufe enormen Einfluss auf die innerbetrieblichen Prozesse und somit auf die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen hat. Daher untersuchten z. B. Madinei et al. (2020) die Dauer der Tätigkeitsdurchführung für präzise manuelle Montageaufgaben unter verschiedenen Ausführungsbedingungen mit dem Exoskelett BackX. Ogunseiju et al. (2021) analysierten die benötigte Zeit für manuelle Tätigkeitsdurchführungen von Bauarbeitern mit dem Exoskelett FLx Ergo Skeleton. Beide Studien zeigen auf, dass die Dauern der durchgeführten Tätigkeiten unter Verwendung eines Exoskeletts steigen und die Effizienz dadurch sinkt.

Aus den bisherigen Untersuchungen mit Exoskeletten lassen sich u. a. keine gesicherten Erkenntnisse zur Langzeitwirkung, Lastumverteilungen, allgemeine Anforderungen und Standards für die Anwendung sowie Bewertungen ableiten. Außerdem sind keine Studien bekannt, die die Auswirkung von Exoskeletten auf die Effizienz der Arbeitsabläufe an manuellen Kommissionierarbeitsplätzen untersuchen. Aus diesem Grund werden an der Professur für Arbeitswissenschaft der TU Dresden umfangreiche Studien zur Untersuchung der Kommissionierzeiten bei Kommissioniertätigkeiten mit rumpfunterstützenden passiven Exoskeletten durchgeführt. Für eine Effizienzanalyse von Exoskeletten ist die Unterteilung in Haupt- und Nebentätigkeiten sinnvoll. Während der Kommissionierung findet ein ständiger Wechsel zwischen Haupt- und Nebentätigkeiten statt. Den *Haupttätigkeiten* sind alle Arbeitsschritte zugeordnet, bei denen die physische Belastung der Tätigkeiten im wesentlich erhöhten Bereich liegt,

sodass ein Exoskeletteinsatz nach Ausschöpfung aller technischen und organisatorischen Maßnahmen in Betracht gezogen werden kann. Bei allen anderen Tätigkeiten, bei denen das Exoskelett keine Unterstützungsfunktion bietet, handelt es sich im Versuchsdesign um *Nebentätigkeiten*. Da Exoskelette während eines Kommissionierungsvorgangs prozessbedingt nicht dauerhaft an- und abgelegt werden können, sollten für eine Leistungsbetrachtung sowohl Haupt- als auch Nebentätigkeiten untersucht werden. Selbst wenn Exoskelette Vorteile in den Haupttätigkeiten bieten, könnten diese im Rahmen der Nebentätigkeiten, bei denen kein Exoskelett benötigt wird, verringert oder ganz eliminiert werden. Für die Untersuchungen kamen zwei passive rumpfunterstützende Exoskelette zum Einsatz (BackX und Paexo Back der Firma Ottobock).

2. Laborstudie zu Haupttätigkeiten

Für die Untersuchung der Kommissionierleistung bei Haupttätigkeiten der Kommissionierung kam zunächst das Exoskelett BackX zum Einsatz. Insgesamt 11 männliche Versuchspersonen (23,63 Jahre, SD = 3,25; 181,18 cm, SD = 5,10; 77,81 kg, SD = 10,64) nahmen an der Laborstudie teil. Jede Versuchsperson durchlief 12 Expositionen, die sich durch ein 2 (Lastmasse: 7,5 kg vs. 12,5 kg) x 3 (Belastung der Körperhaltung laut erweiterter Leitmerkmalmethode: gering vs. mittel vs. stark) x 2 (Exoskelett: mit vs. ohne) Versuchsdesign ergeben.

Die Aufgabe der Versuchspersonen entsprach den Haupttätigkeiten Heben, Halten und Tragen von Lasten. Die Höhe der Belastungen für alle Expositionen wurde mithilfe der Leitmerkmalmethoden (spezielles Screening) der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2019) konzipiert. Durch eine unterschiedliche Anzahl an Hebevorgängen (zw. 111 und 336) je Exposition war es möglich, die Punktwerte aller Expositionen in Kombination mit festgelegten differenten Belastungshöhen auf das gleiche Niveau zu bringen. Die Belastungshöhe lag dabei im wesentlich erhöhten Bereich (Punktwert ca. 67), sodass ein theoretischer Exoskeletteinsatz in der Praxis gerechtfertigt wäre.

Auf Grundlage einer abhängigen Stichprobe wurde zur Auswertung der Daten eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung eingesetzt. Die statistische Auswertung der Versuche hat ergeben, dass alle drei Haupteffekte signifikant waren:

- Durch den Einsatz eines Exoskeletts sank die Kommissionierleistung ($F(1,10) = 10,133$, $p = 0,010$: $\hat{\eta}_p^2 = 0,503$).
- Wird die Lastmasse erhöht, sank die Kommissionierleistung ($F(1,10) = 29,988$, $p < 0,001$: $\hat{\eta}_p^2 = 0,750$).
- Die Belastung durch die Körperhaltung hatte einen Einfluss auf die Kommissionierleistung ($F(2,20) = 13,573$, $p < 0,001$: $\hat{\eta}_p^2 = 0,576$), wobei Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Tests darauf schließen lassen, dass die Kommissionierleistung bei der am geringsten belastenden Körperhaltung signifikant höher war als bei den anderen beiden, die sich wiederum nicht voneinander unterschieden.

Alle Interaktionseffekte waren nicht signifikant.

Die Untersuchung der Kommissionierleistung bei Haupttätigkeiten für das Exoskelett Paexo Back beginnt im März 2024.

3. Laborstudie zu Nebentätigkeiten

Für die Betrachtung der Nebentätigkeiten der manuellen Kommissionierung sind die Untersuchungen für beide Exoskelette abgeschlossen. Für die Laborstudie wurden Zeitdaten unter standardisierten Laborbedingungen für 11 männliche Versuchspersonen (23,0 Jahre, SD = 2,73; 181,18 cm, SD = 4,67; 76,18 kg, SD = 4,20) ermittelt. Das Versuchsdesign war für beide Exoskelette identisch.

Die Höhe der Belastungen für alle Expositionen wurde ebenfalls mithilfe der Speziellen Screeningverfahren „Leitmerkmalmethoden“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2019) konzipiert. Die Belastungshöhe der Versuche lag im unteren grünen Bereich der Belastungsampel und bestätigt damit die geringe physische Belastung der Expositionen.

Jede Versuchsperson durchlief für die zwei Exoskelette jeweils 18 Expositionen, die sich durch die fünf Nebentätigkeiten, des Faktors Exoskelett (mit vs. ohne) und weiteren Faktoren innerhalb der Nebentätigkeiten ergeben. Die Beschreibung der Nebentätigkeiten, deren Faktoren sowie die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 1 zu finden. Die Auswertung der deskriptiven Statistik hat ergeben, dass die Zeitdauern aller untersuchten Nebentätigkeiten durch die Verwendung eines Exoskeletts erhöht wurden. Signifikante Unterschiede zeigten sich in den Nebentätigkeiten Körperfortbewegung, Bücken und teilweise beim Ziehen und Schieben eines Kommissionierwagens (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Beschreibung der Nebentätigkeiten und Inferenzstatistik

Nebentätigkeiten	Ergebnisse
Körperfortbewegung in der Ebene Zusätzlicher Faktor: <ul style="list-style-type: none"> Wegstrecke (15 m vs. 75 m) 	Back X: <ul style="list-style-type: none"> signifikant längere Dauer der Nebentätigkeit durch Exoskeletteinsatz ($t(10) = 1,91$, $p = 0,04$, $d = 0,58$) Paexo Back: <ul style="list-style-type: none"> signifikant längere Dauer der Nebentätigkeit durch Exoskeletteinsatz ($t(10) = 2,08$, $p = 0,03$, $d = 0,63$) Effekt stärker bei längerer Wegstrecke ($t(10) = 1,90$, $p = 0,04$, $d = 0,57$)
Besteigen einer Treppe (13 Stufen jeweils 15 cm hoch)	Keine signifikanten Ergebnisse
Herabgehen einer Treppe (13 Stufen jeweils 15 cm hoch)	Keine signifikanten Ergebnisse
Ziehen und Schieben eines Kommissionierwagens über 15 m Zusätzliche Faktoren: <ul style="list-style-type: none"> Belastungsart (Ziehen vs. Schieben) Lastmasse (75 kg vs. 150 kg) 	Paexo Back: <ul style="list-style-type: none"> signifikant längere Dauer der Nebentätigkeit durch Exoskeletteinsatz ($t(10) = 3,89$, $p < 0,01$, $d = 1,17$) Sonst keine signifikanten Ergebnisse

Bücken zu festgelegten Markern ohne Fortbewegung, 5 Bückvorgänge in einer Exposition	Back X: <ul style="list-style-type: none"> signifikant längere Dauer der Nebentätigkeit durch Exoskeletteinsatz ($t(10) = 1,85$, $p = 0,047$, $d = 0,56$) Paexo Back: <ul style="list-style-type: none"> signifikant längere Dauer der Nebentätigkeit durch Exoskeletteinsatz ($t(10) = 6,997$, $p < 0,01$, $d = 2,11$)
--	--

4. Diskussion

In Zeiten von Fachkräftemangel suchen Unternehmen nach Technologien, die ihre Mitarbeiter entlasten und zusätzliche Motivation schaffen. Der Einsatz von Exoskeletten könnte dazu beitragen, Arbeitsbedingungen zu optimieren. Die Forschung zum Thema Exoskelette wird stetig vorangetrieben, dennoch sind noch zahlreiche Fragen zu deren Einsatz offen. Die beschriebenen Studien sollen dazu beitragen, einen Teil der Lücke zu schließen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen sollte betrachtet werden, inwieweit sich der Einsatz von Exoskeletten auf die Leistung des Menschen auswirkt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass durch den Einsatz der getesteten Exoskelette die Dauer der untersuchten Haupttätigkeit Heben, Halten und Tragen sowie die Dauern für die Nebentätigkeiten Körperfortbewegung und Bücken signifikant erhöht wird. Für die Nebentätigkeit Ziehen und Schieben eines Kommissionierwagens konnte lediglich mit dem Exoskelett Paexo Back ein signifikanter Anstieg der Zeitdauern festgestellt werden.

Die gewonnenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einsatz von Exoskeletten einen negativen Einfluss auf die innerbetrieblichen Abläufe eines Logistikunternehmens nehmen könnte, da die Dauer der Tätigkeitsdurchführung im gesamten Arbeitsprozess steigt. Damit werden die Ergebnisse von Ogunseiju et al. (2021) und Madinei et al. (2020) bestätigt. Erwähnt werden sollte an dieser Stelle, dass die gewonnenen Ergebnisse unter Laborbedingungen für ein begrenztes Probandenkollektiv entstanden sind. In Folgestudien sollten neben einem weiblichen Probandenkollektiv auch ältere Versuchspersonen getestet werden, um vollumfängliche Kenntnisse über die Auswirkungen eines Exoskeletteinsatzes auf die Kommissionierleistung zu erhalten.

Um das volle Einsatzpotential von Exoskeletten bewerten zu können, sollte nicht allein die Effizienz, die von einem Exoskeletteinsatz ausgeht, herangezogen werden. Die Chancen, die damit einhergehen, können vor allem auf die Anpassungs-, Entlastungs- und Unterstützungsfähigkeit zurückgeführt werden. Daher sollten Exoskelette weiter erforscht, weiterentwickelt und zielgerichtet eingesetzt werden, um lokale physische Belastungen zu verringern.

5. Literatur

BAuA. (2019). MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. <https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20190821>

- 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(5), 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Glitsch U, Bäuerle I, Hertrich L, Heinrich K & Liedtke M (2020). Analyse von Exoskeletten mit biomechanischer Simulation. *ASU*, 55(08). <https://doi.org/10.17147/asu-2008-8414>
- Hensel R, Keil M & Bawin S (2018). Feldstudie zur Untersuchung des Laevo-Ergoskelettes hinsichtlich Usability, Diskomfort und Nutzungsintegration. In Frühjahrskongress 2018. GfA-Press.
- Madinei S, Alemi MM, Kim S, Srinivasan D & Nussbaum MA (2020). Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: “Expected” Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance. *Human Factors*, 62(3), 441–457. <https://doi.org/10.1177/0018720819890966>
- Meyer M, Meinicke M & Schenkel A (2023). Krankheitsbedingte Fehlzeiten in der deutschen Wirtschaft im Jahr 2022. In Badura B, Ducki A, Baumgardt J, Meyer M & Schröder H (Hrsg.), *Fehlzeiten-Report 2023* (Bd. 2023, S. 435–520). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-67514-4_29
- Ogunseiju O, Olayiwola J, Akanmu A & Olatunji OA (2021). Evaluation of postural-assist exoskeleton for manual material handling. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1358–1375. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2020-0491>
- Schulz H, Bednorz N, Lückmann P, Hauser S & Management, ild I für L-& D F H für O &. (2020). Anwendung von passiven Exoskeletten in der Intralogistik: Ergebnisse und Tendenzen aus ersten Piloteinsätzen (ild Schriftenreihe der FOM 66). MA Akademie Verlags- und Druck-Gesellschaft mbH. <http://hdl.handle.net/10419/234151>
- Van Engelhoven L, Poon N, Kazerooni H, Barr A, Rempel D & Harris-Adamson C (2018). Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic overhead tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 804–808. <https://doi.org/10.1177/1541931218621184>
- Winter G, Glitsch U & Hedtmann J (2020). Einsatz von Exoskeletten bei körperlicher Arbeit im Logistik- und Transportgewerbe. In Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hrsg.) (S. 101–106).



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